

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geografie (magisterské studium)  
Studijní obor: Kartografie a Geoinformatika



**Bc. Marek Čelonk**

**GENERALIZACE VRSTEVNIC V ROVINATÝCH ÚZEMÍCH**

SIMPLIFICATION OF CONTOUR LINES IN FLAT AREAS

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.

Praha, 2021

UNIVERZITA KARLOVA  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení: **Bc. Marek Čelonk**

Studijní obor: **Kartografie a geoinformatika**

Garant studijního programu/oboru vám schválil přidělení této diplomové práce:

Název práce:

**Generalizace vrstevnic v rovinatých územích**

**Předběžná náplň práce**

Cílem diplomové práce bude návrh metodického postupu pro automatizovanou kartografickou generalizaci vrstevnic v rovinatých územích či územích s malým převýšením, a to s ohledem na zjednodušení jejich tvaru či odstranění nežádoucích oscilací, vstupním parametrem bude maximální výšková chyba. Generalizované vrstevnice, vhodné zejména pro topografické mapy velkých měřítek, by měly respektovat doporučená kartografická pravidla.

Praktické ověření efektivity metodiky bude provedeno na vhodné datové sadě digitálního modelu terénu (DMR 5G) v rozsahu do 5 mapových listů, výsledky budou porovnány s existujícími mapovými výstupy podobného měřítka (ZABAGED, ZTM5), statisticky zpracovány a vizualizovány prostřednictvím vhodných kartografických metod.

Jednotlivé kroky budou implementovány ve formě skriptů ve vybraném programovacím jazyce (Python), vizualizace výstupů proběhne v některém z vhodných SW (ArcGIS).

**Rozsah průvodní zprávy:** 60–80 stran.

**Rozsah grafických prací:** 5–10 stran.

### **Seznam odborné literatury:**

IMHOF, E. (1982): Cartographic Relief Presentation. Walter de Gruyter, Berlin, 388 s.

VEVERKA, B., ZIMOVÁ, R. (2008): Topografická a tematická kartografie. České vysoké učení technické, Praha, 198 s.

GOODCHILD, M. F., HUNTER, G. J. (1997): A simple positional accuracy measure for linear features. International Journal of Geographical Information Science, 11, č. 3, s. 299 – 306.

GÖKGÖZ, T., (2005): Generalization of contours using deviation angles and error bands. The Cartographic Journal, 42, č. 2, s. 145 – 156.

CETINKAYA, B. a kol. (2006). Contour Simplification with Defined Spatial Accuracy. Workshop of the ICA Commission on Map Generalisation and Multiple Representation, 7 s.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: 30. ledna 2018

Termín odevzdání diplomové práce: dle harmonogramu příslušného akademického roku

V Praze dne 30. ledna 2018

.....  
Garant studijního programu/oboru

.....  
Vedoucí práce

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 27. srpna 2021

.....

Bc. Marek Čelonk



## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce doc. Ing. Tomášovi Bayerovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval Mgr. Petru Dušánkovi ze Zeměměřického úřadu za poskytnutí testovacích dat připravovaného mapového díla ZTM5. V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou při zpracování diplomové práce i v průběhu celého studia.

# Abstrakt

## Generalizace vrstevnic v rovinatých územích

Diplomová práce se zabývá kartografickou generalizací vrstevnic. Hlavním cílem této práce bylo navrhnout metodu generalizace vrstevnic zobrazující terén v rovinatém území. Navržená metoda byla určena pro topografické mapy velkých měřítek 1 : 10 000 a větší. V práci je představeno několik možných strategií generalizace. Nejperspektivnější se jeví metoda založená na výpočtu generalizačního potenciálu. Algoritmus se snaží respektovat kartografická pravidla pro tvorbu vrstevnic. Algoritmus byl implementován v programovacím jazyce Python s využitím knihovny Arcpy, tak aby výsledky mohly být zobrazeny v tradičních GIS softwarech. Algoritmus byl testován na datech DMR5G a porovnán s profesionálně vytvořenými vrstevnicemi připravovaného mapového díla ZTM5. Dosažené výsledky jsou prezentovány na přiložených mapových výstupech.

**Klíčová slova:** vrstevnice, kartografická generalizace, vyhlazení, digitální kartografie, výškový buffer, Douglas-Peucker, Chaikins, GIS

# **Abstract**

## **Simplification of contour lines in flat areas**

The diploma thesis is focused on the cartographic generalization of contour lines derived from dense point clouds in flat territories, where the original contour lines tend to oscillate. The main aim is to propose, develop and test a new algorithm for the contour simplification preserving the given vertical error and reflecting the cartographic rules. Three methods designed for large scale maps (1 : 10 000 and larger) are presented: the weighted average, modified Douglas-Peucker and potential-based approach. The most promising method is based on the repeated simplification of contour line segments by calculating the generalization potential of its vertices. The algorithm is implemented in Python 2.7 with the use of Arcpy library was tested on DMR5G data, the simplified contour lines were compared with the result created by a professional cartographer. Achieved results are presented on attached topographic maps.

**Keywords:** contours, cartographic generalization, digital cartography, vertical buffer, smoothing, GIS

# Obsah

Obsah .....	8
Seznam zkratek .....	11
Seznam obrázků .....	12
Seznam tabulek .....	18
1 Úvod .....	20
2 Literární řešerše .....	22
2.1 Metody ředění DMT .....	22
2.2 Metody generalizace vrstevnic .....	25
2.3 Metody vyhlazení vrstevnic .....	27
3 Problematika vrstevnic z pohledu kartografie .....	29
3.1 Vrstevnice a její parametry .....	29
3.1.1 Interval vrstevnic .....	30
3.1.2 Typy vrstevnic .....	31
3.2 Kartografické vlastnosti vrstevnic .....	32
3.3 Vlastnosti aproximovaných vrstevnic .....	35
3.4 Výškový buffer .....	37
3.4.1 Oversampling terénu .....	40
3.5 Přesnost vrstevnic .....	41
3.5.1 Polohová/výšková chyba vrstevnic .....	41
3.5.2 Tvarové chyby vrstevnic .....	44
3.5.3 Kartografická reprezentace chyb vrstevnic .....	50
4 Kartografická generalizace vrstevnic .....	53
4.1 Kartografická generalizace .....	53
4.1.1 Metody generalizace .....	55
4.1.2 Automatizace kartografické generalizace .....	57

4.2	Návrh metodiky pro generalizaci vrstevnic .....	58
4.2.1	Požadavky kladené na generalizační metody .....	60
4.2.2	Ředění DMT .....	61
4.2.3	Vlastní kartografická generalizace vrstevnic .....	61
4.2.4	Metoda váženého průměrování .....	63
4.2.5	Metoda modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu .....	66
4.2.6	Metoda potenciálu .....	69
4.2.7	Postprocessing vrstevnic .....	76
4.3	Vyhazení vrstevnic .....	76
4.4	Hodnocení generalizace .....	78
5	Implementace navržených metod .....	79
5.1	Knihovna Arcpy .....	79
5.2	Předzpracování dat .....	81
5.3	Modifikovaný Douglas-Peuckerův algoritmus .....	85
5.3.1	Výpočet průsečíku generalizovaného segmentu a výškového bufferu .....	86
5.4	Metoda generalizačního potenciálu .....	87
5.5	Postprocessing dat .....	90
5.5.1	Vyhazení vrstevnic .....	91
6	Výsledky práce .....	93
6.1	Testované generalizační algoritmy .....	93
6.2	Vstupní parametry algoritmu .....	93
6.2.1	Předzpracování vstupních vrstevnic .....	94
6.2.2	Velikost výškového bufferu .....	94
6.2.3	Volba typu výškového bufferu .....	97
6.2.4	Metoda výpočtu potenciálů .....	98
6.2.5	Maximální délka generalizovaného segmentu .....	99
6.2.6	Odstranění sousedních segmentů s různou délkou .....	100

6.2.7	Postprocessing generalizovaných vrstevnic .....	101
6.3	Vstupní data .....	101
6.4	Testovací oblasti .....	102
6.5	Dosažené výsledky .....	103
6.5.1	Dubá 9-7 .....	104
6.5.2	Hradec Králové 3-1 .....	112
6.5.3	Litoměřice 7-5 .....	119
6.5.4	Mimoň 6-2 .....	126
6.5.5	Nymburk 5-9 .....	133
6.6	Shrnutí dosažených výsledků .....	140
7	Závěr .....	147
	Seznam literatury .....	149
	Seznam příloh .....	153

## Seznam zkratek

DMT – digitální model terénu

DMR5G – Digitální model reliéfu České republiky 5. generace

DP – Douglas-Peucker algoritmus

TIN – nepravidelná trojúhelníková síť (triangulated irregular network)

ZABAGED – Základní báze geografických dat

ZM10 – Základní mapa 1 : 10 000

ZTM5 – Základní topografická mapa 1 : 5 000

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Vrstevnice vytvořená koridorovou metodou Voroného diagramů. Zdroj: Pícek (2017).....	27
Obr. 3.1: Ukázky používaných vrstevnic v mapových dílech SM5 (nahore) a ZM10 (dole).....	30
Obr. 3.2: Typy vrstevnic, a – základní vrstevnice, b – zdůrazněná vrstevnice, c – doplňková vrstevnice. ....	32
Obr. 3.3: Vrstevnice tvořící self intersection. ....	34
Obr. 3.4: Vrstevnice korespondující s průběhem vodního toku. ....	34
Obr. 3.5: Oblouk navzorkovaný lomenou čarou, úhly mezi segmenty, a – $170^\circ$ , b – $160^\circ$ , c – $150^\circ$ . ....	35
Obr. 3.6: Vliv měřítka na vnímání čáry jako hladké. ....	36
Obr. 3.7: Výšková chyba vzniklá aproximací (šedě), vrstevnice (hnědě) a aproximovaná vrstevnice (černě), a – vzorkování s krokem 10 m, b – vzorkování s krokem 20 m. ....	36
Obr. 3.8: Vrstevnice a klasický buffer 10 m (vlevo), vrstevnice a výškový buffer 1 m (vpravo).....	37
Obr. 3.9: Ukázka 2 vrstevnic s výškou $z_1$ , $z_2$ a jejich výškových bufferů $B_{dz}(z_1)$ , $B_{dz}(z_2)$ . ....	38
Obr. 3.10: Výškový buffer – profil terénu. Vrstevnice (hnědě), horní hranice výškového bufferu (červeně) a spodní hranice výškového bufferu (modře), a – běžný reliéf, b – rovinatý terén s oscilacemi ....	38
Obr. 3.11: Ukázky výškového buffer s různou hodnotou k. Vrstevnice (hnědě), horní hranice bufferu (červeně), dolní hranice bufferu (modře). ....	40
Obr. 3.12: Vrstevnice o ZIV = 2 m: a) vygenerované z TIN DMT vytvořeného z DMR 5g, b) detail oscilace vrstevnice v rovinatém území (červeně vrstevnice z TIN DMT, hnědě z rastrového DMT. ....	41
Obr. 3.13: Výšková chyba $m_z$ a polohová chyba $m_s$ a jejich vzájemný vztah. ....	42
Obr. 3.14: Vrstevnice s příliš dlouhými segmenty jako důsledek nevhodné generalizace. ....	44
Obr. 3.15: Histogram distribuce délek segmentů vrstevnic poskytnutých od Zeměměřického úřadu. ....	45
Obr. 3.16: Histogram distribuce délek segmentů vrstevnice, a – vhodné rozdělení, b – nevhodné rozdělení. ....	46



Obr. 3.17: Histogram poměrů délek segmentů vrstevnic poskytnutých od Zeměměřického úřadu. ....	46
Obr. 3.18: Histogram distribuce poměrů délek sousedních segmentů, a – vhodné rozdělení, b – nevhodné rozdělení. ....	47
Obr. 3.19: Histogram distribuce úhlů mezi segmenty vrstevnic poskytnutých od Zeměměřického úřadu. ....	48
Obr. 3.20: Histogram distribuce úhlů mezi sousedními segmenty, a – vhodné rozdělení, b – nevhodné rozdělení. ....	48
Obr. 3.21: Positional displacement. Zdroj: McMaster (1986).....	49
Obr. 3.22: Area displacement. Zdroj: McMaster (1986).....	49
Obr. 3.23: Polohová chyba, generalizovaná vrstevnice (hnědě), referenční vrstevnice (černě), a – velká polohová chyba, b – minimální polohová chyba. ....	51
Obr. 3.24: Detail výškové chyby, generalizovaná vrstevnice (hnědě), referenční vrstevnice (černě), a – záporná výšková chyba, b – kladná výšková chyba.....	52
Obr. 4.1: Vrstevnice a výškový buffer vytvořený z TIN (a), aplikování eliminace malých prvků (b). ....	63
Obr. 4.2: Vytvoření trojúhelníků z nejbližších bodů, a – korektní trojúhelník, b - chybný trojúhelník.....	64
Obr. 4.3: Míra generalizace v závislosti na počtu iterací.....	65
Obr. 4.4: Chyby ve výsledku generalizace metodou průměrování centroidem trojúhelníku, a - originální vrstevnice, b - generalizovaná vrstevnice.....	65
Obr. 4.5: Postup generalizace pomocí modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu. ....	67
Obr. 4.6: Výsledky generalizace modifikovanou metodou Douglas-Peucker.....	68
Obr. 4.7: Aproximovaný výškový buffer (žlutě).....	70
Obr. 4.8: Výpočet vzdáleností nejbližších bodů od úsečky mezi prvním a posledním bodem trojice. ....	72
Obr. 4.9: Výpočet vzdáleností všech bodů výškového bufferu podél úsečky. ....	73
Obr. 4.10: Výpočet potenciálu z dopočtu úhlu svíraného trojicí bodů. ....	74
Obr. 4.11: Přepočítání potenciálu. ....	75
Obr. 4.12: Princip Chaikinsova algoritmu, zdroj: Joy (1999).....	77
Obr. 5.1: Vrstevnice před (vlevo) a po (vpravo) ořezání okrajů.....	82
Obr. 6.1: Výškové buffery s různou hodnotou k. ....	95
Obr. 6.2: Vliv šířky bufferu na generalizaci. ....	96

Obr. 6.3: Vliv typu výškového bufferu, a – aproximovaný buffer, nejbližší bod, b – úplný buffer, všechny body podél segmentu. ....	97
Obr. 6.4: Vrstevnice generalizované v závislosti na výpočtu potenciálu, a – minimální, b – maximální, c – průměrná vzdálenost generalizovaného segmentu od bufferu, d – úhlový potenciál.....	98
Obr. 6.5: Vliv omezení délky segmentu u generalizace modifikovanou metodou Douglas-Peucker.....	99
Obr. 6.6: Vliv omezení délky segmentu u generalizace metodou úhlového potenciálu. ....	100
Obr. 6.7: Odstranění krátkých segmentů generalizované vrstevnice (šedě před odstraněním, hnědě po odstranění) .....	101
Obr. 6.8: Vybrané testovací lokality.....	103
Obr. 6.9: Náhled na testovací oblast Dubá 9-7. ....	104
Obr. 6.10: Vrstevnice, mapový list Dubá 9-7 se základním intervalem 1m:a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP. ....	105
Obr. 6.11: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Dubá 9-7. ....	106
Obr. 6.12: Histogramy poměrů délek segmentů r vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Dubá 9-7.....	107
Obr. 6.13: Histogramy úhlů $\omega$ mezi segmenty vrstevnic (vstupní i generalizované) pro mapový list Dubá 9-7.....	108
Obr. 6.14: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou GP pro oblast Dubá 9-7. ....	109
Obr. 6.15: Výšková chyba, mapový list Dubá 9-7: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5.....	111
Obr. 6.16: Rozdílový rastr pro oblast Dubá 9-7. ....	112
Obr. 6.17: Náhled na testovací oblast Hradec Králové 3-1. ....	112
Obr. 6.18: Vrstevnice, mapový list Hradec Králové 3-1 se základním intervalem 1m:a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP. ....	113
Obr. 6.19: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Hradec Králové 3-1.....	114

Obr. 6.20: Histogramy poměrů délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Hradec Králové 3-1. ....	115
Obr. 6.21: Histogramy úhlů $\omega$ mezi segmenty vrstevnic (vstupní i generalizované) pro mapový list Hradec Králové 3-1. ....	116
Obr. 6.22: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Hradec Králové 3-1. ....	117
Obr. 6.23: Výšková chyba, mapový list Hradec Králové 3-1: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5 .....	118
Obr. 6.24: Rozdílový rastr pro oblast Hradec Králové 3-1. ....	119
Obr. 6.25: Náhled na testovací oblast Litoměřice 7-5, ZM10. ....	119
Obr. 6.26: Vrstevnice, mapový list Litoměřice 7-5 se základním intervalem 1m: a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP. ....	120
Obr. 6.27: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Litoměřice 7-5. ....	121
Obr. 6.28: Histogramy poměrů délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Litoměřice 7-5. ....	122
Obr. 6.29: Histogramy úhlů mezi segmenty (vstupní i generalizované) vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5. ....	123
Obr. 6.30: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Litoměřice 7-5. ....	124
Obr. 6.31: Výšková chyba, mapový list Litoměřice 7-5: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5 .....	125
Obr. 6.32: Rozdílový rastr pro oblast Litoměřice 7-5. ....	126
Obr. 6.33: Náhled na testovací oblast Mimoň 6-2, ZM10. ....	126
Obr. 6.34: Vrstevnice, mapový list Mimoň 6-2 se základním intervalem 1m: a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP. ....	127
Obr. 6.35: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Mimoň 6-2. ....	128
Obr. 6.36: Histogramy poměrů délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Mimoň 6-2. ....	129
Obr. 6.37: Histogramy úhlů mezi segmenty vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Mimoň 6-2. ....	130

Obr. 6.38: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Mimoň 6-5.....	131
Obr. 6.39: Výšková chyba, mapový list Mimoň 6-2: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5.....	132
Obr. 6.40: Rozdílový rastr pro oblast Mimoň 6-2. ....	133
Obr. 6.41: Náhled na testovací oblast Nymburk 5-9. ....	133
Obr. 6.42: Vrstevnice, mapový list Nymburk 5-9 se základním intervalem 1m:a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP. ....	134
Obr. 6.43: Histogramy délek segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.....	135
Obr. 6.44: Histogramy poměrů délek segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9....	136
Obr. 6.45: Histogramy úhlů mezi segmenty vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.....	137
Obr. 6.46: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Nymburk 5-9. ....	138
Obr. 6.47: Výšková chyba, mapový list Nymburk 5-9: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5.....	139
Obr. 6.48: Rozdílový rastr pro oblast Mimoň 6-2. ....	140
Obr. 6.49: Průběh vrstevnice (hnědá) zatížené výškovou chybou $m_z$ v důsledku předzpracování výškového bufferu (modře – výškový buffer, červeně – eliminované části).....	141
Obr. 6.50: Vrstevnice v místě sedla, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP. ....	141
Obr. 6.51: Vrstevnice v místě terénní vlny, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP .....	142
Obr. 6.52: Vrstevnice v místě svahového břehu, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP. ....	142
Obr. 6.53: Rozestup vrstevnic, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP. ....	143
Obr. 6.54: Vrstevnice se self-intersections, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM.....	143
Obr. 6.55: Protínající se vrstevnice, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP. ....	144
Obr. 6.56: Vrstevnice u vodního toku, a) ukázka ZM10, b) vytvořené lineární interpolací, c) generalizované metodou DPM, d) generalizované metodou GP.....	144

Obr. 6.57: Vrstevnice u meandru, a) ukázka ZM10, b) vytvořené lineární interpolací, c) generalizované metodou DPM, d) generalizované metodou GP. ....	145
Obr. 6.58: Chyby zachování křivosti (šedě - generalizovaná vrstevnice, hnědě – vyhlazená vrstevnice), a) z důvodu vyhlazení, b) z důvodu postprocessingu. ....	145

## Seznam tabulek

Tab. 3.1: Konstanty pro konkrétní měřítka a intervaly vrstevnic. Zdroj: Imhof (1982).	43
Tab. 4.1: Metody geometrické generalizace u liniových prvků. Zdroj: Li a Wong (2008)	57
Tab. 5.1: Parametry PC	80
Tab. 5.2: Indexy vrcholů vrstevnice, předchůdců a následníků	88
Tab. 6.1: Formát vstupních dat.	102
Tab. 6.2: Vybrané testované lokality (celkem 5)	103
Tab. 6.3: Základní charakteristika území Dubá 9-7	104
Tab. 6.4: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Dubá 9-7.	106
Tab. 6.5: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Dubá 9-7.	107
Tab. 6.6: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Dubá 9-7.	108
Tab. 6.7: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou GP pro oblast Dubá 9-7.	109
Tab. 6.8: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Dubá 9-7	110
Tab. 6.9: Statistika rozdílového rastru pro oblast Dubá 9-7.	111
Tab. 6.10: Základní charakteristika území Hradec Králové 3-1	112
Tab. 6.11: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1	114
Tab. 6.12: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1.	115
Tab. 6.13: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1	116
Tab. 6.14: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Hradec Králové 3-1.	116
Tab. 6.15: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1.	117
Tab. 6.16: Statistika rozdílového rastru pro oblast Hradec Králové 3-1.	118
Tab. 6.17: Základní charakteristika území Litoměřice 7-5	119
Tab. 6.18: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5	121
Tab. 6.19: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5.	122
Tab. 6.20: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5	123
Tab. 6.21: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Litoměřice 7-5	124
Tab. 6.22: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5	124
Tab. 6.23: Statistika rozdílového rastru pro oblast Litoměřice 7-5.	125
Tab. 6.24: Základní charakteristika území Mimoň 6-2.	126

Tab. 6.25: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2. ....	128
Tab. 6.26: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2. ....	128
Tab. 6.27: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2. ....	129
Tab. 6.28: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Mimoň 6-2. ....	130
Tab. 6.29: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2. ....	131
Tab. 6.30: Statistika rozdílového rastru pro oblast Mimoň 6-2. ....	132
Tab. 6.31: Základní charakteristika území Nymburk 5-9. ....	133
Tab. 6.32: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9. ....	135
Tab. 6.33: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9. ....	135
Tab. 6.34: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9. ....	136
Tab. 6.35: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Nymburk 5-9. ....	137
Tab. 6.36: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9. ....	138
Tab. 6.37: Statistika rozdílového rastru pro oblast Mimoň 6-2. ....	139
Tab. 6.38: Množství bodů splňující výškovou chybu $m_z$ . ....	140

# 1 Úvod

Pro tvorbu map, 3D modelů, provádění geografických či kartografických analýz je nezbytně nutné mít k dispozici přesná topografická data. Pro jejich sběr se v současné době používají metody terestrické nebo metody dálkového průzkumu Země (DPZ). Metody DPZ umožňují získat o zkoumaném území velké množství dat s vysokým prostorovým rozlišením i přesností. Ačkoliv se to na první pohled může jevit jako výhoda, v mnoha případech je míra vzorkování terénu příliš podrobná (tzv. oversampling), a může negativně ovlivňovat následnou kartografickou reprezentaci. Vzniká tedy požadavek na generalizaci vstupních dat nebo vytvořených vrstevnic.

Typickým příkladem mohou být data leteckého laserového skenování (ALS) a jejich následná kartografická reprezentace. Problém se projevuje zejména v oblastech s rovinatým nebo mírně skloněným terénem; na těchto územích dochází často k oscilacím vrstevnic. Zatímco při přímé tvorbě vrstevnic z bodového mračka může dojít k nevhodné kartografické reprezentaci v podobě různých tvarových artefaktů, při příliš vysoké míře generalizace dochází ke ztrátě informace o tvaru reliéfu.

Tato práce si dává za cíl navrhnout metodu redukující oscilaci vrstevnic vzniklých výpočtem z bodového mračka v rovinatém terénu tak, aby byla zachována výšková chyba vrstevnic. Výsledné vrstevnice by měly věrně reprezentovat daný terén se všemi individuálními tvary, bez artefaktů tak, aby byly vhodné pro použití v topografických mapách velkých měřítek 1 : 5 000 – 10 000.

Vlastní metodika snažící se respektovat kartografická pravidla je rozdělena do několika fází. Prvním krokem je předzpracování vstupních dat tvořených vrstevnicemi a příslušejícími výškovými buffery zahrnující odstranění kartografických segmentů, které nejsou významné vzhledem k měřítku generalizované mapy. Takové vrstevnice nejsou vhodné jako finální reprezentace terénu, mají stále příliš komplikovaný tvar. Následuje jejich kartografická generalizace, při které dochází ke zjednodušení tvaru vynecháním málo významných vrcholů. Klasické algoritmy pro generalizování polylinií však nejsou vhodné, protože nezachovávají výškovou chybu vrstevnic. Proto bude v této práci navrženo vlastní řešení problému respektující výškovou chybu generalizované vrstevnice využívající výškový buffer. Byly navrženy tři generalizační metody: metoda váženého průměrování, modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu a potenciálová metoda. V dalším kroku bude provedeno vyhlazení vrstevnic, cílem bude odstranění nevhodných lomů a náhlých změn tvaru tak, aby výsledné vrstevnice působily v mapách estetičtěji,



ale nedošlo k potlačení významných rysů terénu. Výsledky generalizačních algoritmů byly otestovány na datech tvořených body DMR5G a porovnány s kartografickými výstupy připravovaného mapového díla ZTM5, doposud neveřejného, zapůjčeného pouze pro vlastní diplomovou práci.

Struktura diplomové práce vypadá takto: v kapitole 2 je zpracována rešerše problematiky členěná do tří stěžejních částí reprezentující jednotlivé fáze generalizačního algoritmu. Vrstevnicím jako kartografickému znaku je věnována kapitola 3. Popis kartografické generalizace a návrh vlastní generalizační metody nalezneme v kapitole 4, následná implementace v programovacím jazyce Python je popsána v kapitole 5. Hodnocení dosažených výsledků nalezneme v kapitole 6.

## 2 Literární řešerše

V této kapitole jsou uvedeny práce zabývající se alespoň jednou z dílčích úloh potřebných k vytvoření kartograficky vhodných vrstevnic. První krok, kterému se kapitola 2.1 věnuje je ředění DMT. Jedná se především o metody, které odstraňují redundantní prvky v bodovém mračnu s cílem zmenšit jeho prostorové rozlišení. U bodových množin s vysokou prostorovou hustotou je nutné tento krok zařadit do předzpracování dat, diplomová práce však vzhledem ke vstupním datům na tuto fázi předzpracování neklade klíčový důraz. V kapitole 2.2 jsou následně popsány existující metody pro generalizaci vrstevnic (popř. polylinií). V kapitole 2.3 nalezneme řešerši metod pro následné vyhlazení generalizovaných vrstevnic.

### 2.1 Metody ředění DMT

Ředění povrchové reprezentace terénu představují často řešený problém, se kterým se můžeme kromě geoinformatiky a kartografie setkat i v dalších oborech, kde je nutné snížit velikost datového souboru a tím rychlost načítání či vytváření 3D scén, ale zároveň zachovat celkový tvar zkoumaného objektu i s detaily, například strojírenství, archeologie, zdravotnictví, ale také například herní průmysl.

Podle Zang a kol. (2018) lze zjednodušení bodového mračna provádět třemi různými přístupy: zjednodušením sítě, aproximací bodů nebo přímou eliminací bodů v bodovém mračnu. V oblasti geoinformatiky je nejčastěji využívaným typem digitálního modelu terénu model rastrový nebo model polyedrický (TIN). TIN je tvořen trojúhelníky, každý trojúhelník je definován vrcholy, hranami a plochou vyplňující prostor mezi vrcholy, tzv. faces. Algoritmy zjednodušující TIN lze dělit na základě přístupu. Generalizace může být prováděna pro vrcholy, hrany nebo faces. První návrh algoritmu generalizující vrcholy TINu vytvořil Schroeder (1992). Algoritmus se skládá ze tří fází. První je popis geometrie a topologie lokálního vrcholu, podle kterého je vrchol přiřazen do určité třídy. V druhé fázi jsou vyhodnocena decimální kritéria pro daný vrchol podle příslušnosti k třídě. V poslední fázi dojde k triangulaci a vyplnění vzniklých děr v síti. Tuto metodu lze použít i pro decimaci hran nebo celých trojúhelníků. Další přístup představuje slučování koplanárních plošek, takové plošky jsou spojeny do většího polygonu a je provedena jeho retriangulace, při které vznikne menší počet nových plošek (DeHaemer a Zyda, 1991). Metoda re-tilingu vkládá náhodně nové vrcholy na povrch sítě, které jsou poté přemístěny na místa s maximální křivostí. Originální vrcholy jsou

poté odmazány (Turk, 1992). Jiné metody využívají například: clusterování vrcholů, wavelety nebo tzv. energy function optimization (Cignoni a kol., 1997). Proces opakované retriangulace může být výpočetně a paměťově náročný. Výhodou je, že vytvořená síť nese informaci o vzájemném vztahu jednotlivých bodů a vytvořeném povrchu.

Turk (1992) vytvořil algoritmus, který využívá aproximační přístup pro zjednodušení bodového mračna. Algoritmus náhodně přidává uživatelem určený počet bodů na povrch modelu. Umístění takto přidaných bodů je dále upraveno pomocí vzájemného odpuzování sousedních bodů, tak aby byl zachován charakter originálního modelu. Poté je provedena retriangulace. Tato metoda pracuje s již existující triangulací. Pauly, Gross a Kobbelt (2002) využívají tento přístup pro zjednodušení bodového mračna bez triangulace. Alexa (2003) využívá pro aproximaci bodového mračna metodu nejmenších čtverců a poté dochází k decimaci aproximovaného bodového mračna. Sim (2005) představil metodu, která využívá dělení s využitím octree a transformuje nepravidelné bodové mračno na pravidelnou bodovou mřížku, kde jsou výšky jednotlivých bodů interpolovány z originálu. V literatuře se také lze setkat s termínem „coarse-to-fine“, kdy je snadné nastavovat míru eliminace a kontrolovat míru výsledné hustoty bodového mračna dle požadavků uživatele. Algoritmus vytvoří podmnožinu bodů z existujícího bodového mračna, v prvním kroku pouze ze tří nejvzdálenějších bodů. Pro tyto body jsou vytvořeny Voroného diagramy. Z originálního bodového mračna jsou k jednotlivým diagramům přiřazovány body, pokud splňují podmínku pro maximální vzdálenost, kterou definuje uživatel. Body, které podmínku nesplní, jsou opět analyzovány, vybrány nejvzdálenější a jsou vytvořeny Voroného diagramy. Proces se následně opakuje, dokud nejsou všechny body zpracovány nebo není dosaženo omezení definovaného uživatelem (Moenning a Dodgson, 2004). Výhodou algoritmu je zachování požadované hustoty bodového mračna. Nevýhodou je menší kontrola nad vlastnostmi zachovaných bodů, zejména polohou, autoři tento problém řeší pomocí převzorkování.

Třetí přístup, kdy jsou body eliminovány přímo z bodového mračna, odstraňuje nevýhody u výše zmíněných metod. Výpočetní náročnost je nižší než v případě retriangulace a jsou také zachovány topologické vztahy mezi body. Pauly (2002) rozděluje algoritmy do dvou tříd, algoritmy decimující bodové mračno na základě clusterování a nebo na základě iterativního zjednodušení. Při clusterování využívá dvou rozdílných přístupů – inkrementální a hierarchický. U inkrementálního přístupu je z bodového mračna na začátku vybrán náhodný bod a pomocí metody nejbližšího souseda

jsou přidávány do clusteru další body z okolí, dokud cluster nedosáhne maximální velikosti zadané uživatelem. Nutno podotknout, že maximální velikost může být přesažena, pokud po ukončení algoritmu zůstanou body bez clusterové příslušnosti, ty jsou poté přidány do clusterů s již maximálním počtem bodů. Li a kol. (2017) ve své metodě nejdříve bodové mračno klasifikují do tří kategorií podle úhlových odchylek normálových vektorů. Pro clusterování je použit algoritmus k-means s rozdílným nastavením pro každou klasifikační třídu. Díky aplikování výpočtu Hausdorffovy vzdálenosti je vylepšeno chování metody v místech hran objektu. U hierarchického přístupu dochází k postupnému dělení bodového mračna a vytvářejí se binární stromy. Dělení končí v okamžiku, kdy jsou hodnoty variance menší než zadaná hraniční hodnota. Zhao a kol. (2016) hierarchickou metodu vylepšili zachováním bodů reprezentující lokálně významné tvarové prvky, metoda je adaptivní vzhledem k povrchu. V obou přístupech jsou posléze clusteru nahrazeny representativním bodem, nejčastěji se jedná o centroidy. Metody clusterování, u kterých probíhá několikrát čtení vstupní množiny bodů, jsou výpočetně i časově náročné. Několik autorů se snaží tuto nevýhodu eliminovat využitím tzv. one-pass algoritmů. Jedná se o algoritmy, které vstupní data čtou pouze jednou. Jinou clusterovací metodu využívá Fotakis (2006), který vytvořil výpočetně nenáročný algoritmus. Algoritmus přiřazuje body k tzv. facilities, které představují centroidy vznikajících clusterů. K přiřazení bodu k existující facility nebo vytvoření nové facility dochází na základě nejmenší vzájemné vzdálenosti a pravděpodobnosti, které jsou souhrnně nazývány jako facility costs. Počet facilities se v průběhu výpočtu může také snižovat, když dochází ke kontrole prahové hodnoty poloměru u již existujících facilities. Jedná se o nedeterministickou metodu. Csirik a kol. (2010) místo vzdáleností bodů od jednotlivých facilities využívají poloměr clusteru, po přiřazení bodu nemůže dojít k jeho pozdějšímu přearování do jiného clusteru a clusteru nemohou být spojeny nebo rozděleny jako v případě facilities. Další možný přístup představili Charikar, O'callaghan, Panigrahy (2003), kteří vytvořili algoritmus využívající k-median clusterování.

Při iterativním zjednodušení jsou jednotlivé body bodového mračna eliminovány na základě decimálního operátoru. Linsen (2001) odstraňuje body na základě předpokladu o nadbytečnosti sousedních bodů do určité vzdálenosti. Samotná vzdálenost k rozhodnutí o eliminaci bodu nestačí, protože ve složitém reliéfu je nutné zachovat více bodů, než v rovinném povrchu nebo povrchu s konstantním zakřivením. Pro lepší reflexi členitého terénu a zachování důležitých bodů metoda rozdíl normál a velikost tohoto rozdílu. Metoda dále kontroluje, zda možný eliminovaný bod leží v rovinné oblasti, kde

může být odstraněn. Song (2009) detekuje a zachovává body tvořící významné hrany triangulace. Body reprezentující ploché oblasti eliminuje na základě vzdálenosti k základně tvořené sousedními body. Zajímavý přístup zvolil Fei (2009), který adaptoval Douglas-Peuckerův algoritmus, využívaný hlavně pro generalizaci polylinií, na 3D bodové mračno. Pauly (2002) poukazuje na to, že v případě přímé eliminace bodů může dojít k nevhodnému rozmístění bodů ve finálním bodovém mračnu. Z tohoto důvodu aplikuje tzv. point-pair kontrakci, pomocí které páry bodů převede do bodu jednoho. Tuto kontrakci využívá i Du (2007) pro své adaptivní ředění bodového mračna, avšak metodu zjednodušení vylepšuje o tzv. point-split proces, který upřesňuje oblasti s vyšší variací povrchu.

## 2.2 Metody generalizace vrstevnic

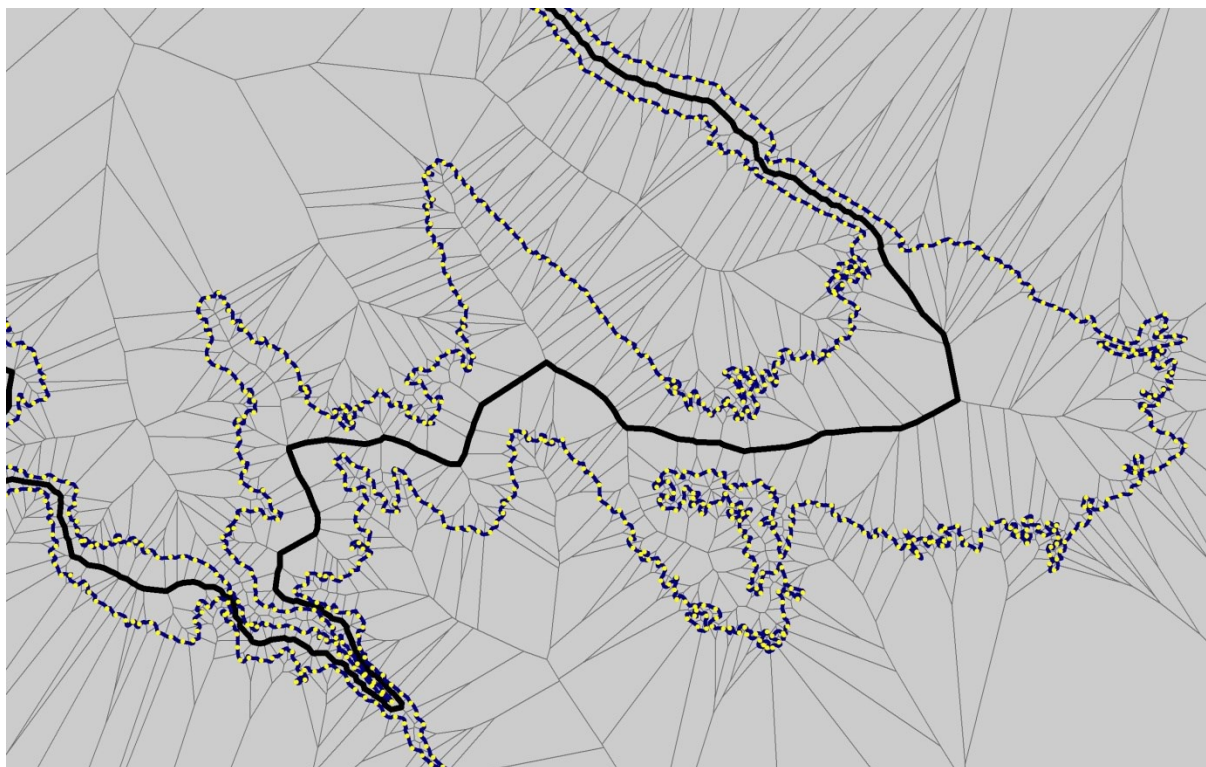
Dříve se pro generalizaci vrstevnic používaly běžné algoritmy pro polylinie. Ty však nedodržovaly zásady kartografické generalizace, které jsou pro generalizaci vrstevnic nezbytné. Tyto nedostatky si uvědomovali Douglas a Peucker (1973) a společně přišli s algoritmem, který je z kartografického pohledu poměrně efektivní, a i dnes je implementován v různých geoinformačních softwarech. Algoritmus využívá koridor o dané šířce a zachovává body, které jsou vně tohoto koridoru. Přes výhodu snadné implementace, stále trpí nedostatky: nedostatek topologické kontroly v průběhu generalizace může způsobovat self intersections, algoritmus také nezachovává křivost (Xie, 2011). Různé práce se snaží tyto problémy eliminovat a nabídnout uspokojivá řešení. O úpravu algoritmu ve smyslu topologické korektnosti se pokoušel Saalfeld (1999), který k ukončovacím podmínkám Douglas-Peuckertova algoritmu přidal testování pro zachování topologických vztahů mezi jednotlivými prvky. Na tuto práci navázali Bertolotto a Zhou (2007) vytvořením tzv. Self-Crossing-Preventing algoritmus, který lépe testuje topologické vztahy a umožňuje zpracovávat větší množství dat. Visvalingam a Whyatt (1993) vytvořili algoritmus rozhodující se na základě velikosti ploch trojúhelníků vytvořených z trojice po sobě jdoucích bodů. Pokud je plocha menší, než zadané minimum je prostřední bod z trojice odstraněn. Nevýhodou tohoto algoritmu je, že všem trojúhelníkům přiřazuje stejnou důležitost bez ohledu na jejich tvar a výsledek může být negativně ovlivněn. Tento problém řeší Zhou a Jones (2005) pomocí tzv. váženou efektivní plochou, která je vypočítána z plochy a tvaru trojúhelníku. S upraveným algoritmem pro generalizaci přišli i Gruppi a kol. (2015), kteří vytvořili metodu zachovávající topologické vztahy mezi prvky, tzv. TopoVW. Li a Openshaw

(1992) vytvořili algoritmus, který se snaží generalizovat prvky stejným způsobem jako lidské vnímání, kdy se zvětšující vzdáleností se liniové objekty mění na body a posléze i tyto zanikají. Hlavním rozhodovacím parametrem algoritmu je velikost nejmenšího viditelného objektu, která je funkcí měřítkového čísla mapy. Na tuto práci navázal Raposo (2013), který aplikuje clusterování vrcholů v šestiúhelníkové teselaci. Qian a kol. (2016) definují dva problémy při generalizování vrstevnic – jak správně rozdělit linii, pokud je příliš dlouhá pro aplikaci jednoho řešení a jak přizpůsobit parametry oblastem s různými geodaty. Definované problémy se snaží odstranit pomocí ODC metody (Oblique-Dividing-Curve). Po rozdělení jsou jednotlivé úseky klasifikovány a pro každou třídu jsou použité různé strategie úprav.

Nevýhodou výše uvedených metod, pokud bychom je použili pro generalizaci vrstevnic, je fakt, že pracují pouze s polohou lomových bodů ve 2D prostoru. Při zpracování není zohledněna nadmořská výška vrstevnice a generalizovaná vrstevnice má tedy proměnnou výškovou chybu.

V literatuře se neobjevuje řešení, které by při generalizování tvaru vrstevnic zachovávalo jejich výškovou chybu, právě tímto směrem se otevírá prostor pro nová řešení popsaná v práci. Jistou podobnost lze vidět v přístupech, které využívají princip výškového bufferu, tzv. error bands, jedná se o obalovou zónu vrstevnice (vrstevnice s nadmořskou výškou  $z \pm \Delta z$ ). Z toho vyplývá, že v rovinnatých územích jsou tyto buffery široké a může zde docházet k větším oscilacím vrstevnice. Buffer se používá pro kontrolu polohové přesnosti vrstevnic (Imhof, 1982). Goodchild a Hunter (1997) používají buffer okolo kontrolní nebo přesné linie a u testovací linie zjišťují procento z celkové délky pro prvky, které jsou vně bufferu. Na práci navazuje Ureña a kol. (2011), kteří nevytvářejí buffer kolem kontrolní linie, ale kolem testovací vrstevnice. Kontrola polohové přesnosti je prováděna na základě výškových bodů získaných přesným měřením. Gökgöz a Selçuk (2004) využili výškový buffer pro modifikaci již existujících tří algoritmů. Jednalo se o algoritmus vynechání  $n$ -tého vrcholu, vzdálenost mezi vrcholy a Douglas-Peuckerův algoritmus. Generalizaci pomocí výškového bufferu představil Gökgöz (2005), který využívá výpočet polohové chyby a spojnic mezi dvěma body, náležících liniím bufferu, o největším sklonu. Cetinkaya a kol. (2006) si uvědomují vliv změny polohy vrstevnic na jejich výškovou chybu, proto aplikují výškový buffer. Vrstevnice jsou poté generalizovány v rámci definované prostorové chyby. V Česku využil Pícek (2017) výškový buffer pro dvě nové metody generalizace vrstevnic. První představená metoda průměrování vytváří příčky mezi nejbližšími body obou výškových bufferů. Každý

centroid takové příčky je nový vrchol generalizované vrstevnice. Autor zmiňuje nedostatky této metody, mezi které patří zejména vytváření smyček v místech se složitým tvarem a potřebu aplikovat metodu v několika iteracích. Následující koridorová metoda s využitím Voroného diagramů odstraňuje zmíněné nedostatky první metody. Pro každý bod na pravé a levé straně výškového bufferu je vytvořen Voroného diagram. S jeho využitím je konstruována diskrétní aproximace střední osy, která představuje hledanou vrstevnici (viz Obr. 2.1).



Obr. 2.1: Vrstevnice vytvořená koridorovou metodou Voroného diagramů. Zdroj: Picek (2017)

## 2.3 Metody vyhlazení vrstevnic

Generalizované vrstevnice mohou být z kartografického i estetického pohledu stále nevhodné, často se mohou nepřírozeně lámat (viz Obr. 2.1). Pro vylepšení plynulého průběhu vrstevnice se používají vyhlazovací metody. V literatuře existuje několik možných přístupů vyhlazení: průměrováním bodu, zadaným délkovým krokem, použitím aproximačních křivek, použití interpolačních křivek. Při metodě průměrování bodu dochází k posunu vrcholů, tak aby byly odstraněny nevhodné lomy prvků. Aritmetický nebo geometrický průměr je vhodné využít, pokud jsou vzdálenosti mezi vrcholy lomené čáry přibližně stejné, v opačném případě je vhodnější použít vážený průměr. Nová poloha vrcholu se určí ze sousedních vrcholů, metodu lze vylepšit přidáním vah. Právě výpočet vážené vzdálenosti využívá ve svém vyhlazovacím algoritmu McMaster (1989).

Irigoyen (2009) používá pro vyhlazení Delaunay triangulaci; k vyhlazení dochází v oblastech, kde se vyskytují ploché trojúhelníky. Po přesunutí upravovaného vrcholu je v dotčené lokalitě provedena retriangulace. Algoritmus iterativně vyhlazuje vrstevnici, dokud je alespoň jeden trojúhelník příliš plochý. Metoda k vrstevnicím nepřistupuje jako k jednotlivým liniím, ale jako ke skupině prvků reprezentující 3D povrch. Metodu průměrování, kterou lze využít na vektorová data nebo na skupinu bodů, představili Mansouryar a Hedayati (2012). V práci těchto autorů je kladený důraz na výsledné zachování detailů a charakteristik daného objektu. Metoda vyhlazení zadáním délkového kroku umožňuje ovlivňovat míru vyhlazení. Algoritmy pracují na principu zadání délkové kroku od počátku, průsečíky s originální linií jsou nové vrcholy. V praxi se nejčastěji setkáváme s použitím různých aproximačních křivek nebo interpolačních křivek. Metoda je založena na skutečnosti, že změna směru křivky je pomalejší a plynulejší než u klasických lomených čar. Při využití aproximačních linií se často používá Bézierova kubika, která nese název po Pierru Bézierovi. Autorem je Paul de Casteljau (1963), jeho jméno nese algoritmus, který se dodnes používá pro tvorbu Bézierových křivek. Chaikin (1974) vytváří Bézierovy křivky pomocí rekursivního algoritmu, čímž se zvýšila rychlost celé operace. Phien a Dejrumrong (2000) se pokoušeli zvýšit výpočetní rychlost zavedeného algoritmu deCasteljau aplikováním generalizačních algoritmů pro Ballovy křivky (Ball, 1974) tvořenou kubickým polynomem. Kubické polynomy využívá také Coonsova kubika (1967), vytvořená křivka neprochází uzlovými body. Další skupinu křivek představují interpolační křivky, které procházejí všemi zadanými lomovými body polylinie. Nejpoužívanějšími interpolačními křivkami jsou kubické spline křivky. Spline křivka je definovaná 3 segmenty a každý je definován 4 koeficienty. Vzniká tak 12 podmínek, které vedou ke vzniku soustavy lineárních rovni. Příkladem může být Catmull-Rom spline (Catmull a Rom, 1974); výhodou je minimální křivost, možnost self-intersections, což je u vrstevnic nežádoucí. Kochanek a Bartels (1984) navrhli modifikaci splinu využívající tři parametry, které ovlivňují chování křivky: tension, continuity, bias, těmito parametry můžeme ovlivnit průběh a tvar vyhlazované vrstevnice.



### 3 Problematika vrstevnic z pohledu kartografie

Tato kapitola se věnuje nejčastěji používanému kartografickému vyjadřovacímu prostředku pro výškopis v topografických mapách velkých měřítek – vrstevnicím. Cílem práce je navrhnout generalizační metodu, která zlepší průběh vrstevnic v rovinatých územích reprezentovaných v mapách velkých měřítek.

Samotné vrstevnice a jejich parametry jsou popsány v kapitole 3.1. V kapitole 3.1.2 je uvedeno základní dělení vrstevnic, které se v kartografii využívá v závislosti na charakteru zobrazovaného reliéfu. Vybrané kartografické vlastnosti vrstevnic jsou diskutovány v kapitole 3.2. V kapitole 3.4 je definován výškový buffer, který slouží k zachování výškové chyby vrstevnice. Kapitola 3.5 se věnuje problematice výpočtu přesnosti vrstevnic.

#### 3.1 Vrstevnice a její parametry

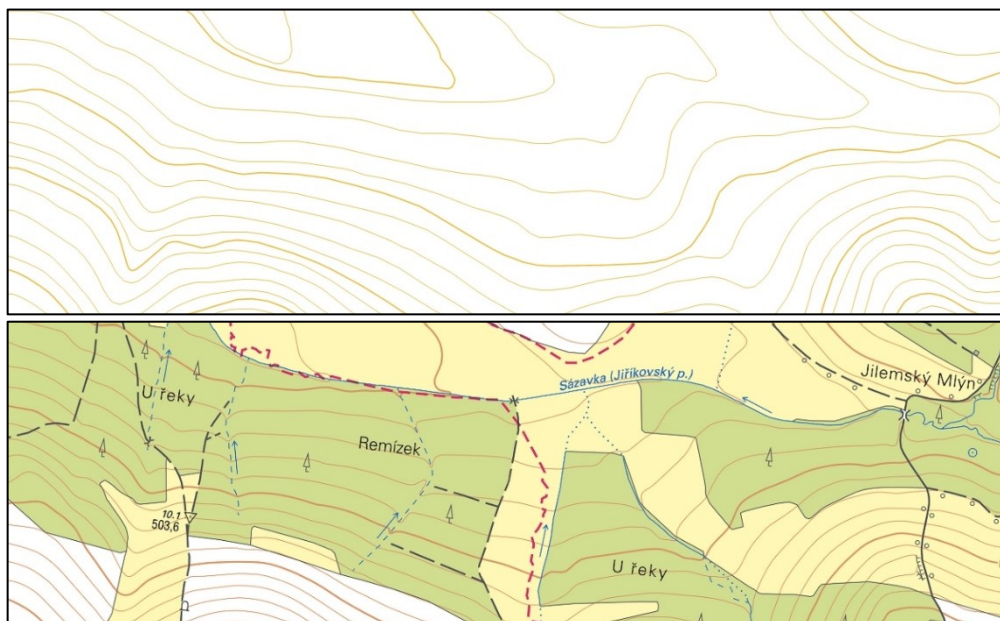
Veverka a Zimová (2008) definují vrstevnici jako: *“uzavřené linie spojující na topografické ploše body o stejné, vhodně zaokrouhlené výšce.”* V praxi vrstevnice často tvoří i neuzavřené linie, protože mapa zobrazuje jen část území.

Čapek (1992) ve své knize definuje vrstevnici jako *“čáru spojující všechny body reliéfu, které spolu těsně sousedí a mají stejnou účelně zaokrouhlenou výšku vzhledem ke srovnávací ploše”*. Synonymem výrazu vrstevnice je termín izohypsa, který se však v praxi téměř nepoužívá.

Použití vrstevnic společně s kótami vytváří přesné a snadno čitelné kartografické vyjádření reliéfu, typické je zejména pro TM velkých měřítek. V mapách se často využívají v kombinaci se stínováním, kdy je potřeba lépe vyjádřit plasticitu terénu (Veverka a Zimová, 2008).

V mnohých případech, kdy je průběh terénu komplikovaný a obtížně čitelný, se k vrstevnicím přidávají dodatečné informace o terénu, a to ve formě kosterních čar, kót, spádovek atd. Spádovka je krátká čára naznačující směr sklonu u uzavřených vrstevnic, kde není možné určit, zda se v daném místě jedná o sníženinu nebo vyvýšeninu (Čapek, 1992).

Ukázky v praxi používaných vrstevnic v mapách velkých měřítek jsou zobrazeny na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Ukázky používaných vrstevnic v mapových dílech SM5 (nahore) a ZM10 (dole).

Níže v kapitole jsou podrobněji popsány jednotlivé parametry vrstevnic.

### 3.1.1 Interval vrstevnic

Hlavním a nejdůležitějším parametrem je interval vrstevnic. Interval vrstevnic nebo také základní interval vrstevnic představuje rozdíl výšek  $\Delta z$  dvou sousedních vrstevnic. V mapách je důležité volit interval vrstevnic tak, aby bylo možné získat názornou představu o průběhu terénu, a nedocházelo ke grafickému slévání vrstevnic; tj. byla zachována čitelnost mapy. Při volbě intervalu vrstevnic se obecně vychází z měřítkového čísla mapy a výškových poměrů území, tj. rozdílu mezi body s minimální a maximální výškou.

V Česku se ve většině případů volí základní interval v závislosti na měřítkovém čísle mapy (Veverka a Zimová, 2008). S ohledem na typický tvar krajiny v Česku, která je převážně plochá, je tento vztah lineární. Pro výpočet základního intervalu vrstevnic lze použít vztah

$$\Delta z = \frac{M}{5000}, \quad (3.1)$$

kde  $M$  představuje měřítkové číslo mapy; např. pro měřítkové číslo  $M = 10\,000$  je doporučený interval vrstevnic  $\Delta z = 2$  m. Existují i další empirické vzorce, které kartografové aplikují jak v rovinatém, tak i ve výškově členitém terénu.

V oblastech vysokohorského reliéfu (Veverka a Zimová, 2008) je používán vztah

$$\Delta z = n \log(n) \tan \beta_{max}, \quad (3.2)$$

kde  $\beta_{max}$  je maximální úhel sklonu úbočí a  $n$  je funkcí měřítkového čísla  $M$

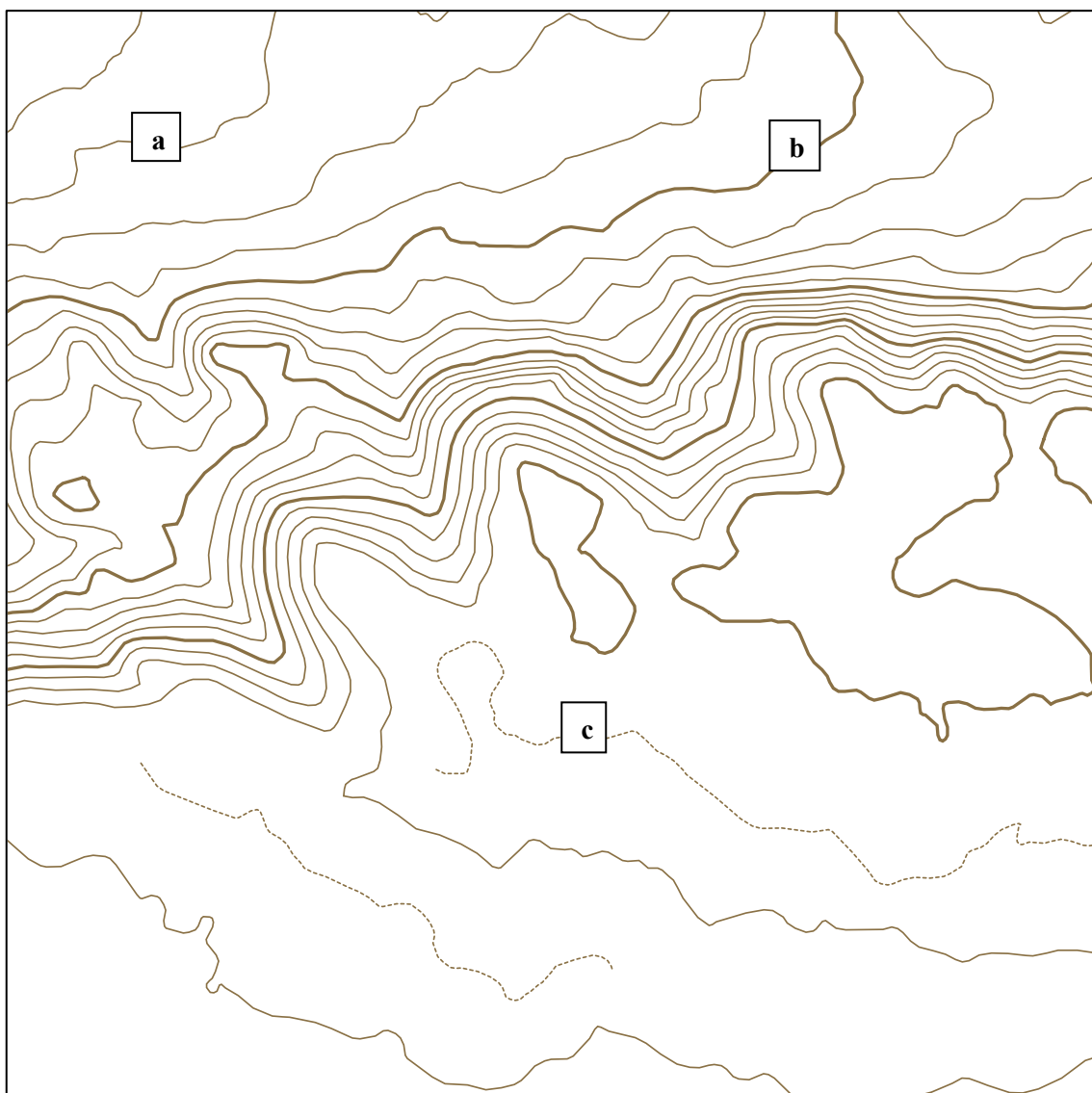
$$n = 0,1M^{\frac{1}{2}}. \quad (3.3)$$

S rostoucí hodnotou měřítkového čísla se základní interval mění pomaleji a reaguje tak na strmý terén; nedochází ke grafickému přeplnění mapy. Je doporučeno, aby rozestup dvou vrstevnic v mapě neklesl pod 0,2 mm (Čapek, 1992), v opačném případě by došlo ke grafickému slití obou vrstevnic.

### 3.1.2 Typy vrstevnic

Podle základního intervalu vrstevnic lze rozlišit 4 typy vrstevnic (Čapek, 1992):

- **Základní vrstevnice**  
Základní vrstevnice jsou v mapě zakresleny tenkou spojitou čarou (viz Obr 3.2a). Mají výšku dělitelnou beze zbytku hodnotou intervalu vrstevnic.
- **Zdůrazněné vrstevnice**  
Využití zdůrazněných vrstevnic napomáhá ke správnému čtení výškopisu v mapě. Zdůrazněné vrstevnice mají výšku dělitelnou pětinasobkem hodnoty intervalu vrstevnic. V místech s velkým sklonem, kde by docházelo ke slévání základních vrstevnic, je možné základní vrstevnice vynechat a zakreslit pouze vrstevnice zdůrazněné. V mapě jsou zakresleny silnější čarou stejné barvy jako základní vrstevnice (viz Obr. 3.2b).
- **Doplňkové vrstevnice**  
Doplňkové vrstevnice se přidávají do mapy v místech, kde je rozestup základních vrstevnic příliš velký, aby vystihl průběh reliéfu. Interval doplňkových vrstevnic je roven jedné polovině nebo jedné čtvrtině hodnoty základního intervalu vrstevnic. V mapě jsou vyjádřeny přerušovanou čarou, která je tenčí než čára použitá u základní vrstevnice (viz Obr. 3.2c).
- **Pomocné vrstevnice**  
Pomocné vrstevnice se používají výjimečně pro doplnění vrstevnicového obrazu. Tento typ vrstevnic se volí často v místech s antropogenními tvary (lomy, povrchové doly), vzniklými působením lidské činnosti.



*Obr. 3.2: Typy vrstevnic, a – základní vrstevnice, b – zdůrazněná vrstevnice, c – doplňková vrstevnice.*

## 3.2 Kartografické vlastnosti vrstevnic

Vrstevnice jsou významným obsahovým prvkem topografických map. Při jejich tvorbě je nutné respektovat některá důležitá kartografická pravidla. Podobné požadavky jsou následně kladeny i na vrstevnice generalizované. Kvantitativní i kvalitativní hodnoty určené aplikací pravidel lze použít jako hodnotící kritéria měřící efektivitu generalizačního algoritmu.

### **P1: Konstantní nadmořská výška**

Vrstevnice má vzhledem k modelu vzniklému ze skutečného terénu navzorkováním konečné podmnožiny bodů konstantní nadmořskou výšku. Model terénu je generalizací skutečného terénu, vrstevnice tedy vůči skutečnému terénu vykazuje „drobné“ výškové

chyby. Změna polohy vrstevnice ovlivňuje její výškovou chybu a naopak. Tuto vlastnost můžeme měřit pomocí kritérií, viz kap. 3.5.2.

#### **P2: Hladkost a spojitost**

U přirozených přírodních tvarů reliéfu je průběh vrstevnice hladký a spojitý. Vrstevnice netvoří dlouhé segmenty nebo ostré hrany. Toto kritérium neplatí u antropogenních objektů, pro které jsou ostré hrany charakteristické. Tuto vlastnost můžeme měřit prostřednictvím geometrických kritérií, viz kap. 3.5.2.

#### **P3: Konstantní základní interval**

Vrstevnice jsou v mapě vykresleny se zvoleným konstantním základním intervalem tak, aby byl v mapě dostatečně reprezentován reliéf území, a zároveň nedocházelo k nadbytečnému grafickému zaplnění mapy nebo slévání vrstevnic při použití malého základního intervalu, viz kap. 3.1.1.

#### **P4: Stejný rozestup sousedních vrstevnic**

Sousední vrstevnice v terénu s konstantním sklonem by měly mít podobné rozestupy a přibližně rovnoběžný průběh. Výjimku tvoří rovinatá území nebo komplikované, zpravidla antropogenní, tvary reliéfu.

#### **P5: Topologická korektnost vrstevnic**

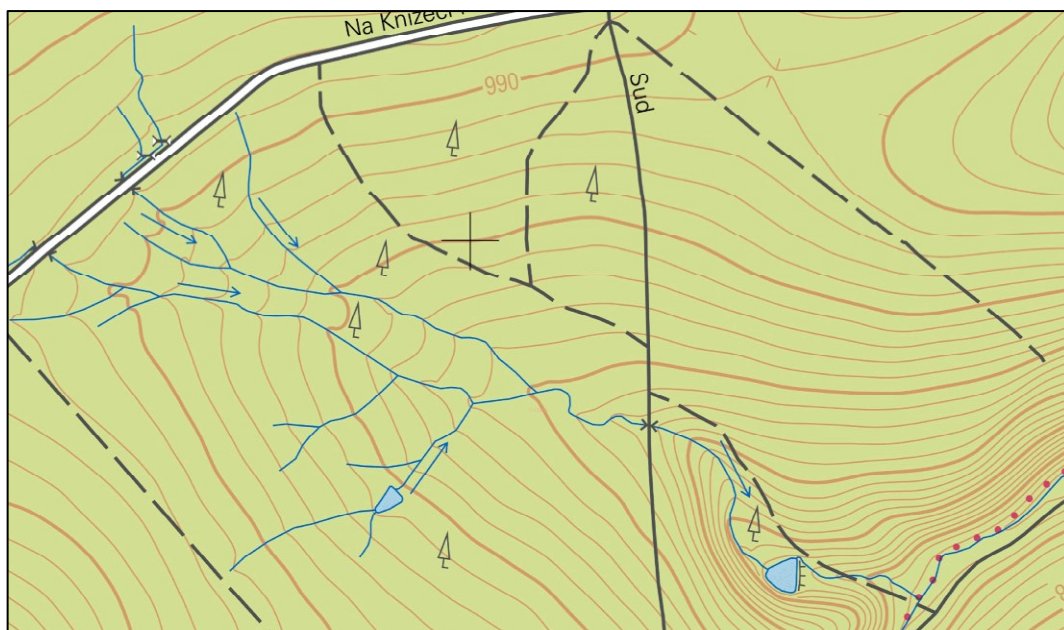
Nemělo by docházet ke vzájemnému křížení vrstevnic stejné ani různé nadmořské výšky. Jedná se o problém self intersections (viz Obr. 3.3). Křížení vrstevnic různé nadmořské výšky při generalizaci lze zamezit použitím vhodného výškového bufferu, viz kap. 3.4, jehož šířka by měla být menší než polovina základního výškového intervalu vrstevnic. Problém může nastávat, pokud by měl být pomocí vrstevnic reprezentován terénní prvek s proměnným půdorysem, jako je například převis.



*Obr. 3.3: Vrstevnice tvořící self intersection.*

#### **P6: Korespondence s ostatními prvky v mapě**

Některé přírodní nebo antropogenní prvky formují reliéf natolik, že je nezbytné tuto skutečnost promítnout i do průběhu vrstevnic. Mezi takové prvky patří například vodní toky, vodní plochy, stavby atd. (viz Obr. 3.4). Tvar vrstevnic je nutné korigovat s ohledem na vodstvo, zejména průběh břehové čáry, a korektní reprezentace spádu, aby nevznikly bezodtoké oblasti.



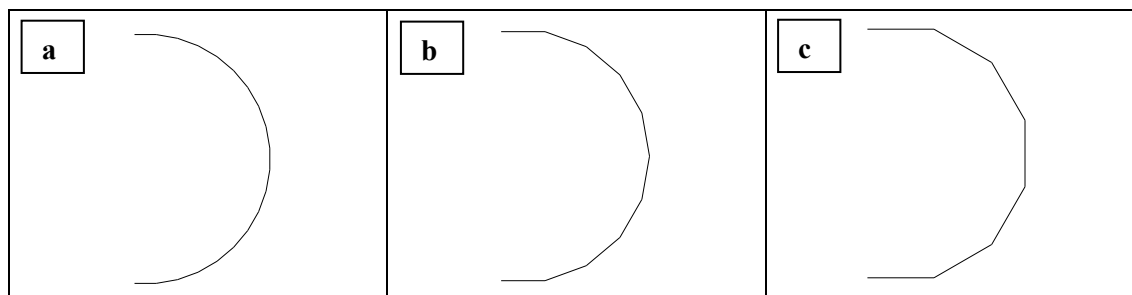
*Obr. 3.4: Vrstevnice korespondující s průběhem vodního toku.*

### 3.3 Vlastnosti aproximovaných vrstevnic

V praxi se vrstevnice v mapě diskrétně aproximují, provádíme tedy jejich vzorkování lomenou čarou se zvoleným délkovým/úhlovým krokem. Z důvodu zjednodušené reprezentace, která je výsledkem kartografické generalizace, je proto potřeba doplnit výše uvedená kartografická pravidla dalšími požadavky, a to zpravidla geometrického charakteru. S jejich pomocí lze verifikovat kartografické vlastnosti vrstevnic:

#### G1: Zachování křivosti vrstevnic

Vrstevnice by měla být vnímána, jako plynulá čára, proto je nutné, aby segmenty netvořily ostré úhly. U aproximované vrstevnice zpravidla požadujeme, aby zůstala zachována křivost v jednotlivých vrcholech lomené čáry. Tento způsob reprezentace vede k proměnnému kroku vzorkování, jsou zachovány úhly mezi segmenty. Adaptivní vzorkování je v praxi obtížnější realizovat. Na obrázku 3.5 jsou zobrazeny oblouky vytvořené liniemi, které svírají úhel  $170^\circ$ ,  $160^\circ$  a  $150^\circ$ . Hodnotu lze aplikovat na mapy různých měřítek, protože je vůči němu invariantní. Čím je délka segmentů větší, tím menší úhel mezi oběma segmenty musí být, abychom vnímali lomenou čáru jako křivku. Za hladké považujeme zpravidla takové křivky, u kterých je úhel segmentů větší než 170 stupňů, a délky segmentů se výrazně neliší. U segmentů svírajících větší úhly již vnímáme přechod mezi segmenty jako ostrý.

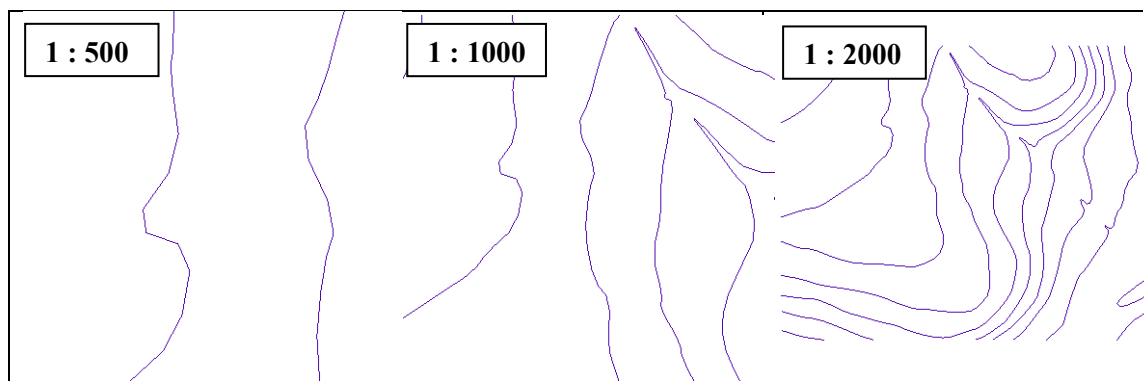


Obr. 3.5: Oblouk navzorkovaný lomenou čarou, úhly mezi segmenty,  $a - 170^\circ$ ,  $b - 160^\circ$ ,  $c - 150^\circ$ .

#### G2: Konstantní krok vzorkování

Častěji je používáno vzorkování s konstantním krokem, které vrstevnici aproximuje lomenou čarou se stejně dlouhými segmenty. Nevýhodou je, že tato aproximace nezachovává křivost vrstevnice, v praxi se však používá poměrně často. Abychom dosáhli pseudohladké vnímání lomené čáry, je nutné snížit délku kroku vzorkování. Délka segmentu je v praxi ovlivněna velikostí měřítkového čísla mapy (viz Obr. 3.6). Aby člověk vnímal čáru jako hladkou, měla by být maximální délka segmentu 2-3 mm v měřítku mapy. Při konstantním kroku vzorkování je zamezeno vzniku příliš dlouhých

segmentů. Výhodou vzorkování s konstantním krokem oproti vzorkování s konstantním úhlem je menší náročnost zpracování, lepší kontrola nad délkou segmentu. Naopak plynulejší průběh aproximované linie může být získán při aproximaci s konstantním úhlem, další výhodou může být kontrola nad velikostí vzniklých úhlů a snížený výskyt segmentů svírající ostrý úhel.

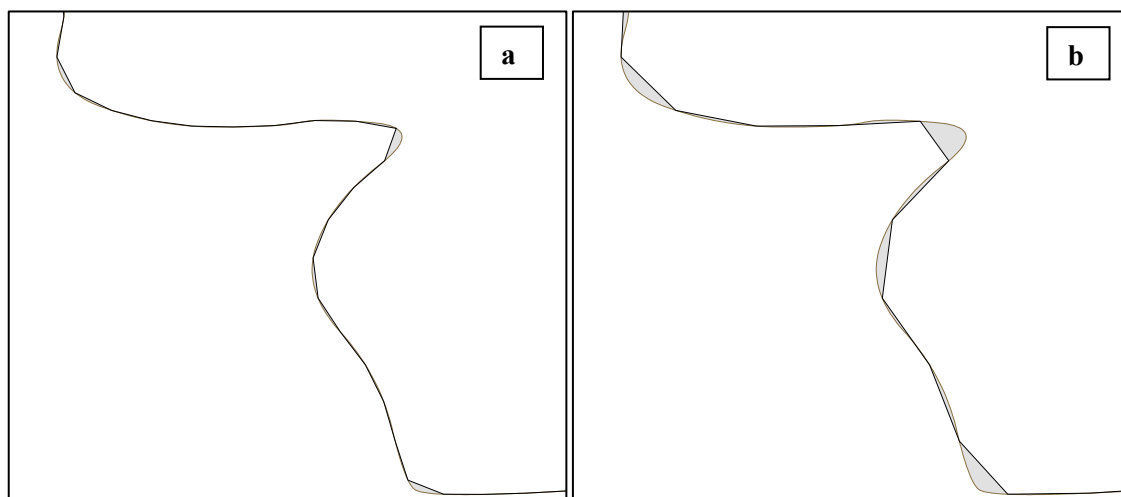


Obr. 3.6: Vliv měřítka na vnímání čáry jako hladké.

Zatímco první metoda vytváří segmenty různé délky s konstantními úhly, druhá generuje segmenty stejné délky, jejichž úhly se mění.

### G3: Zachování výškové chyby

V důsledku diskretizace dochází u generalizovaných vrstevnic ke vzniku výškové chyby. Narůst výškové chyby je přímo úměrný velikosti kroku vzorkování (viz Obr. 3.7).



Obr. 3.7: Výšková chyba vzniklá aproximací (šedě), vrstevnice (hnědě) a aproximovaná vrstevnice (černě), a – vzorkování s krokem 10 m, b – vzorkování s krokem 20 m.

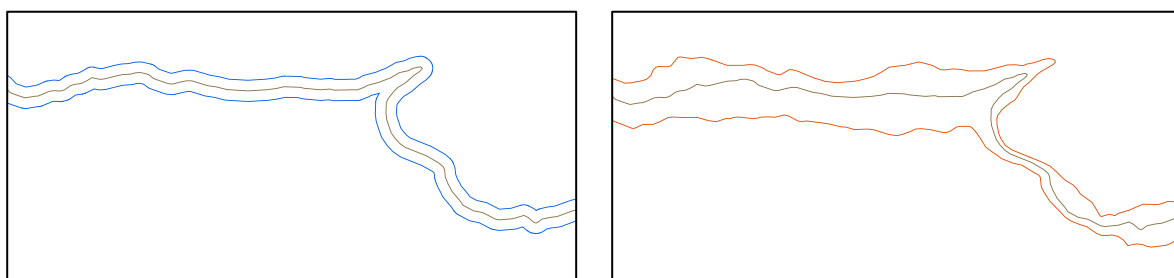
V diplomové práci je jako jeden z nástrojů k dosažení kartograficky vhodných generalizovaných vrstevnic využit výškový buffer. Problematice výškového bufferu se věnuje následující kapitola. Hlavní kritérium, které je díky této metodě dodrženo, je dodržení maximální výškové chyby  $dz$ . Splněno musí být i kritérium pro maximální



polohovou chybu, protože obě chyby vzájemně závislé. Mezi kartografické vlastnosti vrstevnic, které jsou díky výškovému bufferu splněny, patří topologická korektnost.

### 3.4 Výškový buffer

V této kapitole je popsána pomocná geometrická struktura zvaná výškový buffer, která je vertikální analogií klasického bufferu využívaného v geoinformaticce, tj. množiny bodů o stejné vzdálenosti od prvku (offset prvku). Porovnání klasického a výškového bufferu je zobrazeno na obrázku 3.8.

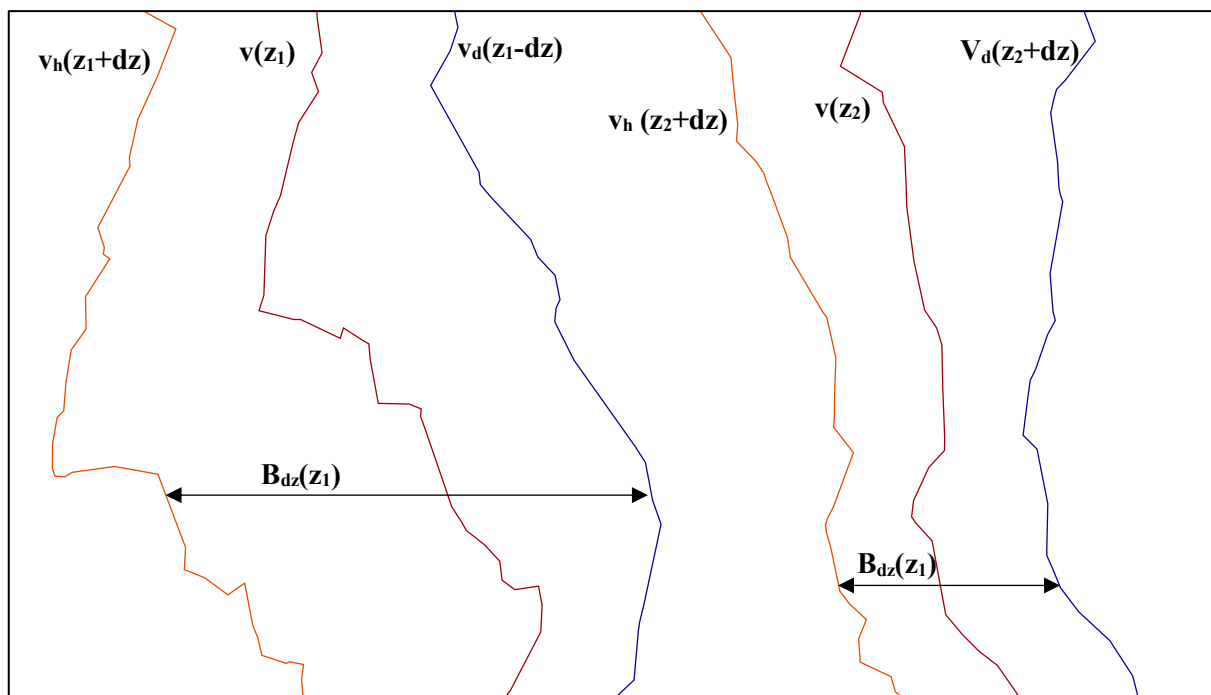


Obr. 3.8: Vrstevnice a klasický buffer 10 m (vlevo), vrstevnice a výškový buffer 1 m (vpravo).

Předpokládejme, že nějaká vrstevnice  $v$  má výšku  $z$  a existuje číslo  $dz$ ,  $dz \in \mathbb{R}^+$ , které je dostatečně „malé“. K takové vrstevnici existuje „horní“ vrstevnice  $v_h(z+dz)$  s výškou  $z + dz$  a „dolní“ vrstevnice  $v_d(z-dz)$  s výškou  $z - dz$  (viz Obr. 3.9). Výškový buffer  $B_{dz}(z)$  představuje množinu bodů

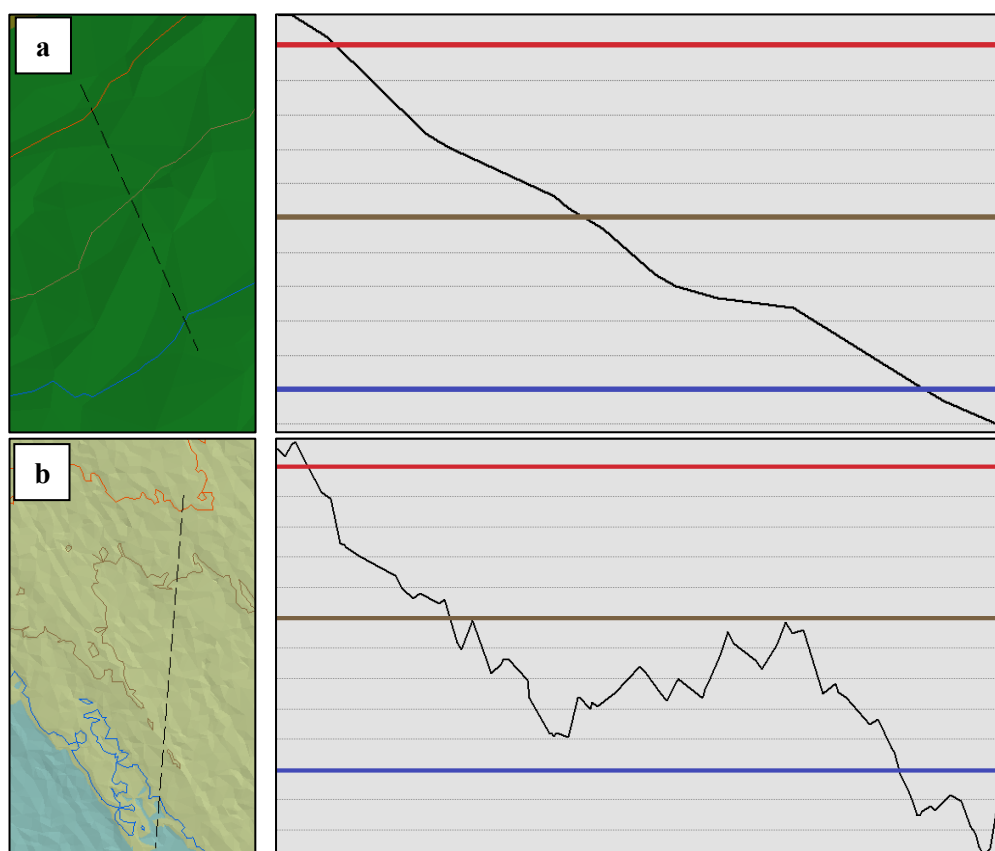
$$B_{dz}(z) = \{P_i, |z_i - z| \leq dz, P_i = [X_i, Y_i, Z_i]\}, \quad (3.4)$$

jejichž absolutní hodnota výškové odchylky  $z_i - z$  od vrstevnice  $v$  s výškou  $z$  je menší než  $dz$ . Představuje tedy uměle uzavřenou oblast mezi vrstevnicemi  $v_d$  a  $v_h$  s odlehlostí menší nebo rovnou  $2dz$ . Vrstevnice  $v_d$  a  $v_h$  mohou být otevřené, uzavřené nebo nemusí existovat.



Obr. 3.9: Ukázka 2 vrstevnic s výškou  $z_1$ ,  $z_2$  a jejich výškových bufferů  $B_{dz}(z_1)$ ,  $B_{dz}(z_2)$ .

Terénní profil s vyznačeným výškovým bufferem je zobrazen na obrázku. Je z něj patrné, že uvnitř bufferu se sklon terénu může měnit (viz Obr. 3.10a). U členitého reliéfu mohou uvnitř bufferu vznikat četná lokální minima (viz Obr. 3.10b).



Obr. 3.10: Výškový buffer – profil terénu. Vrstevnice (hnědě), horní hranice výškového bufferu (červeně) a spodní hranice výškového bufferu (modře), a – běžný reliéf, b – rovinatý terén s oscilacemi

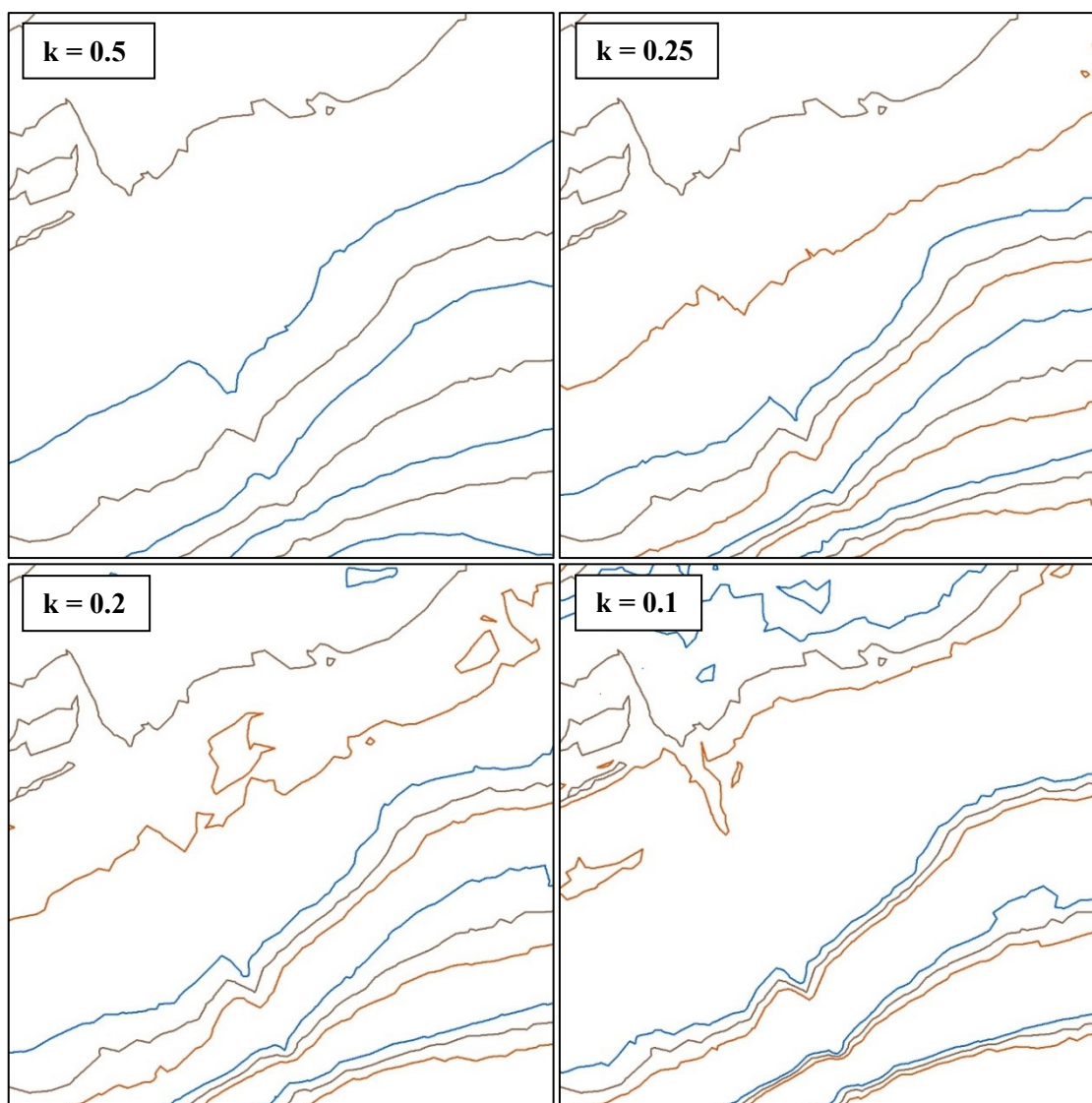
Výškový buffer slouží jako jednoduchý nástroj k ověření zachování výškové chyby vrstevnice v průběhu generalizace. Šířka výškového bufferu odpovídá maximální výškové chybě, kterou může generalizovaná vrstevnice v nějakém bodě nabývat. Pokud generalizovaná vrstevnice leží uvnitř výškového bufferu, splňuje tedy požadavek výškové chyby. Tato vlastnost bude využívána při ověřování, zda je segment vzniklý generalizací platný.

Šířka bufferu se odvíjí od lokálního průběhu reliéfu. V oblastech s větším sklonem je výškový buffer úzký a často má podobný tvar jako vrstevnice, ke které byl vytvořen. Naopak v rovinatých oblastech je výškový buffer velmi široký a odlišný od tvaru vrstevnice. Díky této vlastnosti může dojít k větší generalizaci vrstevnic v rovinatých územích.

Volba „velikosti“  $dz$  výškového bufferu závisí na měřítkovém čísle  $M$  mapy, základního intervalu vrstevnic  $\Delta z$  a požadované míře generalizace. Obecně platí, že čím širší je buffer, tím větší je povolená maximální výšková chyba  $dz$  a míra generalizace bude větší. Zpravidla hodnotu  $dz$  volíme v závislosti na základním intervalu vrstevnic

$$dz = k \cdot \Delta z, \quad (3.5)$$

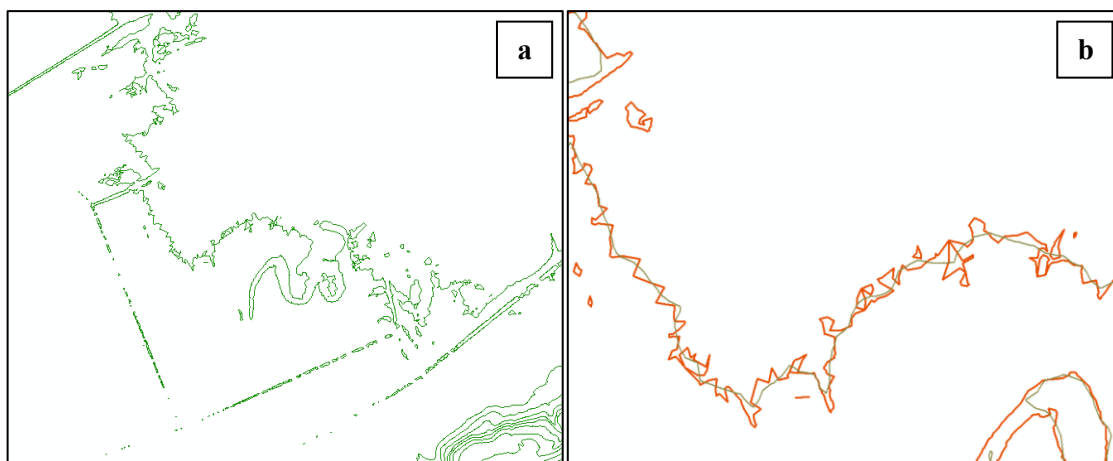
kde  $k \in (0,0.5)$ , (viz Obr. 3.11), ale nejčastěji v praxi používáme 0.1, 0.2 nebo 0.25 násobek základního výškového intervalu  $\Delta z$ . Hodnota koeficientu  $k$  tedy ovlivňuje šířku bufferu a míru generalizace. Pokud je požadována vysoká míra generalizace, lze použít hodnotu  $k = 0.5$ ; v takovém případě bude odpovídat šířka výškového bufferu polovině základního intervalu vrstevnic. Při použití takto širokého bufferu může dojít k dotknutí či až ke slévání dvou sousedních vrstevnic. To je způsobeno tím, že horní hranice výškového bufferu jedné vrstevnice je totožná se spodní vrstevnicí následující vrstevnice. V praxi nemá smysl používat hodnoty  $k > 0.3$ . Malé hodnoty  $k$  budou vytvářet úzké výškové buffery s menším prostorem pro generalizaci. V praxi se osvědčilo používat  $k = 0.25$ .



Obr. 3.11: Ukázky výškového buffer s různou hodnotou  $k$ . Vrstevnice (hnědě), horní hranice bufferu (červeně), dolní hranice bufferu (modře).

### 3.4.1 Oversampling terénu

Přesnost lokalizace veškerých prvků v mapách významně roste. Je to způsobeno hlavně rozvojem metod pro sběr dat a dále technologiemi a softwary, které získaná data zpracovávají. Dochází k tzv. oversamplingu, kdy je zemský povrch příliš hustě navzorkován, a výsledný model zachycuje nadbytečné množství informací s maximální přesností. Takový model je nepřehledný, příliš komplikovaný a z kartografického pohledu nevhodný. Vrstevnice vytvořené z takového modelu jsou zobrazeny na obrázku 3.12, kde je patrné jak vytvoření sekundárních oscilací, tak i tvarově nevhodných artefaktů.



Obr. 3.12: Vrstevnice o ZIV = 2 m: a) vygenerované z TIN DMT vytvořeného z DMR 5g, b) detail oscilace vrstevnice v rovinatém území (červeně vrstevnice z TIN DMT, hnědě z rastrového DMT).

Z kartografického pohledu nejsou takové vrstevnice přímo použitelné v mapě a musí být provedena jejich následná generalizace doplněná vyhlazením.

### 3.5 Přesnost vrstevnic

Díky pokročilým a velmi přesným metodám sběru dat (např. letecké laserové skenování) je možné vytvořit vrstevnice s velmi malou výškovou i polohovou chybou. Přesnost vrstevnice lze určit na základě výpočtu výškové a polohové chyby jednotlivých segmentů vrstevnice. Při generalizaci však dochází k operacím, které ovlivňují polohovou i výškovou chybu vrstevnice. Výsledná přesnost vrstevnic je ovlivněna podobnými faktory jako kartografická generalizace, a to měřítkem mapy, charakterem zobrazovaného území a účelem mapy. Pro zjištění polohové nebo výškové přesnosti provádíme kontrolu takových vlastností vrstevnic, které lze kvantifikovat. Vrstevnice mohou být zatíženy různým typem chyb, které z obecného pohledu můžeme dělit do dvou základních skupin:

- polohová/výšková chyba,
- tvarová chyba.

#### 3.5.1 Polohová/výšková chyba vrstevnic

Polohová a výšková chyba vrstevnic spolu velmi úzce souvisejí. „Špatně“ umístěné vrstevnice jsou zatíženy polohovou chybou, která generuje výškovou chybu. Tento vztah platí i obráceně, kdy výšková chyba tedy ovlivňuje chybu polohovou (Imhof, 1982). Obě výše zmíněné charakteristiky přesnosti můžeme posoudit absolutně vůči stejnému modelu terénu, ze kterého vznikly vrstevnice, nebo relativně vůči jinému přesnějšímu modelu terénu.

Už před více než sto lety představil Koppe (1905) empirickou metodu zjišťování výškové přesnosti, kdy na základě srovnávacích měření zjistil, že průměrná výšková chyba  $m_z$  neznámého bodu v mapě je větší v oblastech se strmějším sklonem. Na základě této zkušenosti navrhl následující vzorec

$$m_z = \pm(A + B \tan \alpha), \quad (3.6)$$

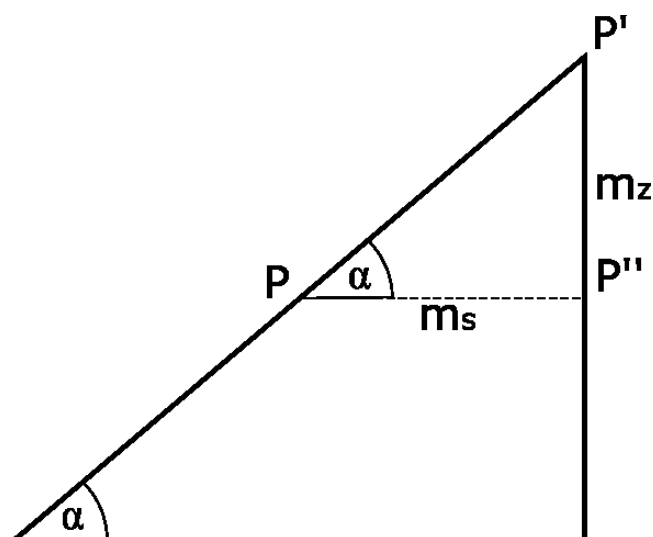
kde A a B jsou empiricky zjištěné konstanty pro danou mapu a úhel  $\alpha$  je sklon v místě daného bodu. První člen je konstantní, druhý člen je funkcí sklonu. Výška zkoumaného bodu je získána interpolací z výšek dvou nejbližších vrstevnic. Ukázka konstant pro vybraná měřítka je uvedena v tabulce 3.1. V různých státech byl vztah upravován, tak aby více vyhovoval místním podmínkám. Polohovou chybu vrstevnice  $m_s$  lze vyjádřit jako funkci sklonu následujícím způsobem

$$m_s = \pm(A \cot \alpha + B). \quad (3.7)$$

Imhof (1982) dává tyto dvě chyby do poměru

$$\frac{m_z}{m_s} = \tan \alpha \quad (3.8)$$

a ukazuje vztah mezi sklonem, polohovou a výškovou chybou. Polohová chyba  $m_s$  tedy roste se zmenšujícím se sklonem  $\alpha$ . Geometrická ilustrace vztahu obou chyb je uvedena na obrázku 3.13. Pro zjednodušení předpokládejme, že mezi dvěma body je sklon terénu konstantní.



Obr. 3.13: Výšková chyba  $m_z$  a polohová chyba  $m_s$  a jejich vzájemný vztah.

Pokud dojde při generalizaci ke změně polohy vrcholu (resp. segmentu), změní se také jeho výška a dochází tak ke vzniku výškové chyby generalizované vrstevnice. V rovinatém terénu může dojít k větší polohové změně vrstevnice při zachování výškové

chyby, než je tomu u stejné chyby v reliéfu s větším sklonem. Tuto souvislost následně využijeme při hodnocení přesnosti generalizovaných vrstevnic. Připomeňme, že se výše uvedený fakt projevuje i v šířce vertikálního bufferu, která je větší v územích s malým sklonem a menší v územích s velkým sklonem.

Měřítko	Interval vrstevnic [m]	A	B
1 : 1 000	1	0,1	0,3
1 : 5 000	5	0,4	3
1 : 10 000	10	1	5
1 : 25 000	10	1	7
1 : 50 000	20	1,5	10

Tab. 3.1: Konstanty pro konkrétní měřítka a intervaly vrstevnic. Zdroj: Imhof (1982)

Další metodu hodnocení přesnosti vrstevnic navrhl Raab (1935), který rozdělil celkovou chybu na několik komponent podle zdroje chyb. Vztahy pro výpočet průměrné výškové chyby  $m'_Z$  a průměrné polohové chyby  $m'_S$  bodu, který byl interpolován z nejbližších vrstevnic, vyjádřil jako kombinaci různých vlivů náhodné povahy ve tvaru

$$m'_Z = \pm \sqrt{m_z^2 + \left(m_s^2 + \frac{m_p^2}{M^2}\right) \cdot \tan^2 \alpha}, \quad (3.9)$$

$$m'_S = \pm \sqrt{m_s^2 + m_z^2 \cdot \cot^2 \alpha + \frac{m_p^2}{M^2}}, \quad (3.10)$$

kde  $m_z$  je průměrná výšková chyba bodu,  $m_s$  je průměrná polohová chyba bodu,  $m_p$  je průměrná grafická chyba mapy a  $M$  je měřítkové číslo mapy

Existuje více pohledů na problematiku „správných“ vrstevnic, hlavně v závislosti na typu, účelu či měřítku mapy. V přesných mapách velkých měřítek je důležité, aby vrstevnice přesně reprezentovaly reliéf a byly výškově i polohově přesné, mnohdy méně vyhlazené. Naopak u map středních až malých měřítek je hlavní funkcí vrstevnic zlepšit prostorový vjem terénu i na úkor výškové nebo polohové chyby a usnadnit získání informace o sklonu a tvaru reliéfu. Takové vrstevnice bývají zpravidla více generalizovány a vyhlazeny. Podle USGS standardu (Muller, 1987) jsou vytvořené vrstevnice správné, pokud má alespoň 90 % testovacích bodů výšku shodnou s výškou interpolovaných vrstevnic  $\pm \Delta z/2$ .

V české kartografii neexistuje jednotná metodika hodnocení vrstevnic, a to ani napříč státním mapovým dílem. U modelu ZABAGED je výšková přesnost závislá na sklonu a členitosti terénu. V odkrytém terénu dosahuje 0,7 – 1,5 m, v sídlech 1 – 2 m a v zalesněném terénu 2 – 5 m. Geometrická přesnost dat ZABAGED je vyčleněna do pěti úrovní:

- **Úroveň A** je přiřazena objektům, které určil přímo správce objektu v souřadnicích.
- **Úrovní B** odpovídají objekty, jejichž poloha je v území jednoznačně určitelná (např. budovy, komunikace) a střední polohová chyba dosahuje hodnoty do 5 m.
- **Úroveň C** odpovídá nižší přesnosti (např. hranice kultur) s hodnotou střední polohové chyby do 15 m.
- **Úroveň D** odpovídá nízké přesnosti (např. obtížně identifikovatelné hranice bažin), s hodnotou střední polohové chyby do 30 m.
- **Úroveň E** se vztahuje k objektům nejnižší přesnosti, jejichž přesnost dosahuje velice proměnných hodnot (např. objekty, které nejsou v terénu patrné, jsou převzaté z tematických map měřítka 1 : 50 000, příp. 1 : 100 000 – rozvodnice nebo hranice geomorfologických jednotek).

### 3.5.2 Tvarové chyby vrstevnic

Vrstevnice mohou splňovat výškovou i polohovou chybu, a přesto nemusí být kartograficky vhodné pro použití v mapě. V kapitolách 3.2 a 3.3 byly představeny vlastnosti vrstevnic, které by měly v ideálním stavu splňovat. V práci bylo následně navrženo několik metod pro hodnocení tvaru vrstevnic a jejich validaci.

#### Délka segmentu

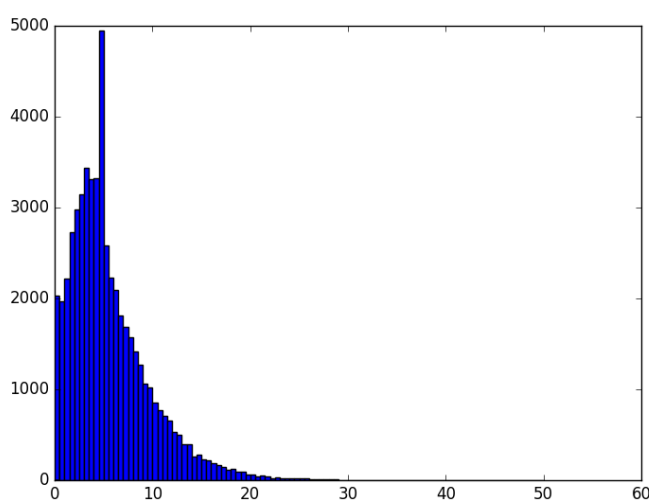
Ideální vrstevnice by neměla obsahovat příliš dlouhé ani krátké segmenty, které jsou v mapách nepřírodní (viz Obr. 3.14).



*Obr. 3.14: Vrstevnice s příliš dlouhými segmenty jako důsledek nevhodné generalizace.*

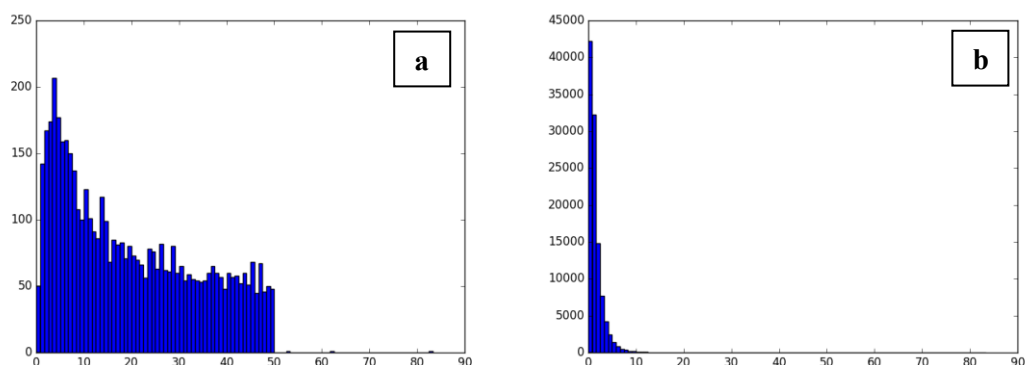


Jednoduchým ukazatelem možných tvarových chyb vrstevnice je výpočet délky jednotlivých segmentů  $d$ . Můžeme získat statistické ukazatele jako je minimum, maximum nebo střední hodnotu. Výsledky mohou být zaneseny do histogramu a srovnány s idealizovaným výstupem, který by vznikl ruční činností kartografa-specialisty. Při analýze vrstevnicového modelu pro základní topografickou mapu 1 : 5 000 poskytnutého od Zeměměřického úřadu bylo zjištěno, že vrstevnice obsahují spíše kratší segmenty, maximální četnost výskytu není u nejkratších segmentů, avšak u segmentů s délkou 5 m. Zastoupení delších segmentů postupně klesá až k ojedinělým extrémům. Histogram odpovídá chí-kvadrát rozdělení (viz Obr. 3.15).



*Obr. 3.15: Histogram distribuce délek segmentů vrstevnic poskytnutých od Zeměměřického úřadu.*

Za vhodné rozdělení četností délek segmentů u generalizovaných vrstevnic je považován i výsledek, kdy je velký až maximální počet segmentů v intervalu odpovídajícímu délce stanovené jako maximální povolená délka segmentu. Nevhodná distribuce nastává, pokud vrstevnice obsahují mnoho dlouhých nebo krátkých segmentů (viz Obr. 3.16b). Vhodná distribuce délek segmentů je zobrazena v obrázku 3.16a.



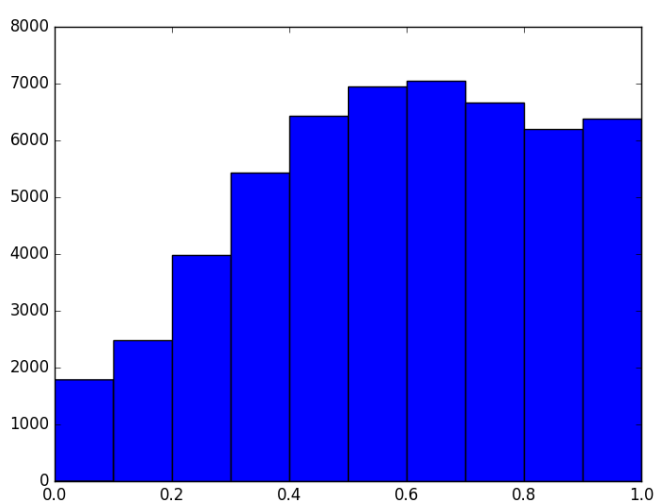
Obr. 3.16: Histogram distribuce délek segmentů vrstevnice, a – vhodné rozdělení, b – nevhodné rozdělení.

### Poměr délek sousedních segmentů

Tvarově korektní vrstevnice jsou tvořeny hlavně segmenty, které mají podobnou délku jako jejich sousední segmenty. Výjimku tvoří místa s ostrými lomy terénu, které se však vyskytují v terénu zřídka. Další indikátor kvality vrstevnic představuje poměr délek sousedních segmentů  $r_d$

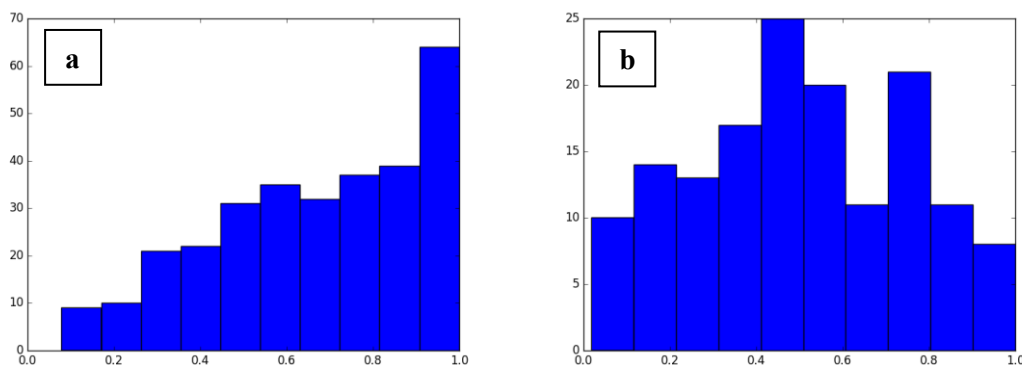
$$r_d = \min\left(\frac{d_1}{d_2}, \frac{d_2}{d_1}\right). \quad (3.11)$$

Výsledky je opět vhodné vyjádřit různými, a to buď extrémními hodnotami, střední hodnotou či pomocí histogramu. Opět byla analyzována data poskytnutá od Zeměměřického úřadu, u kterých je výsledný poměr segmentů většinou větší než 0.5 (viz Obr. 3.17). Tento fakt potvrzuje i obecný požadavek, aby vrstevnice nevytvářela příliš dlouhé nebo krátké segmenty.



Obr. 3.17: Histogram poměrů délek segmentů vrstevnic poskytnutých od Zeměměřického úřadu.

V ideálním případě by se většina poměrů délek segmentů měla blížit hodnotě 1, tj. hodnoty by měly mít přibližně rovnoměrné rozložení. Ukázka vhodné distribuce poměrů délek sousedních segmentů je zobrazena na Obr. 3.18a, naopak nevhodná distribuce je zobrazena na Obr. 3.18b.



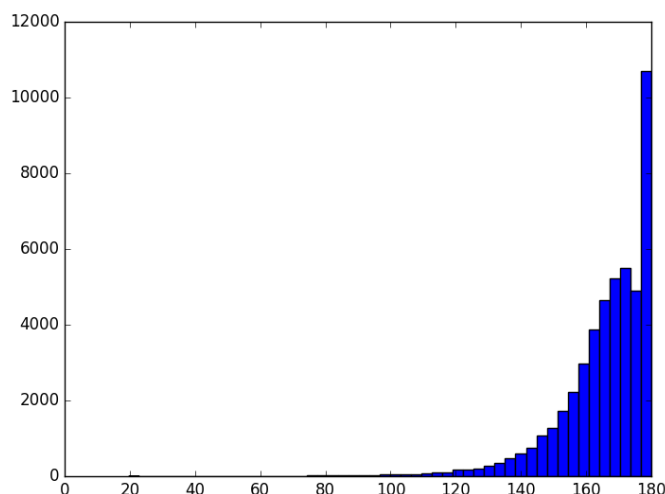
Obr. 3.18: Histogram distribuce poměrů délek sousedních segmentů, a – vhodné rozdělení, b – nevhodné rozdělení.

### Úhel mezi sousedními segmenty

Dalším kritériem popisujícím tvar vrstevnice představují úhly mezi sousedními segmenty. Vrstevnice s nevhodnými oscilacemi, ostrými výběžky nebo dalšími artefakty obsahuje větší počet ostrých úhlů mezi segmenty. Dochází tak k jejímu nepřirozenému lomu, který je vizuálně patrný a rušivý. Kartograficky žádoucí je, aby vrstevnice byla tvořena segmenty, které svírají tupé úhly. Tvar takových vrstevnic je vnímán jako opticky hladší, často nevnímáme, že se jedná o hladkou čáru, ale o aproximaci lomenou čarou. Úhel mezi dvěma sousedními segmenty tvořenými trojicí bodů  $P_{i-1}$ ,  $P_i$ ,  $P_{i+1}$  určíme ze vztahu

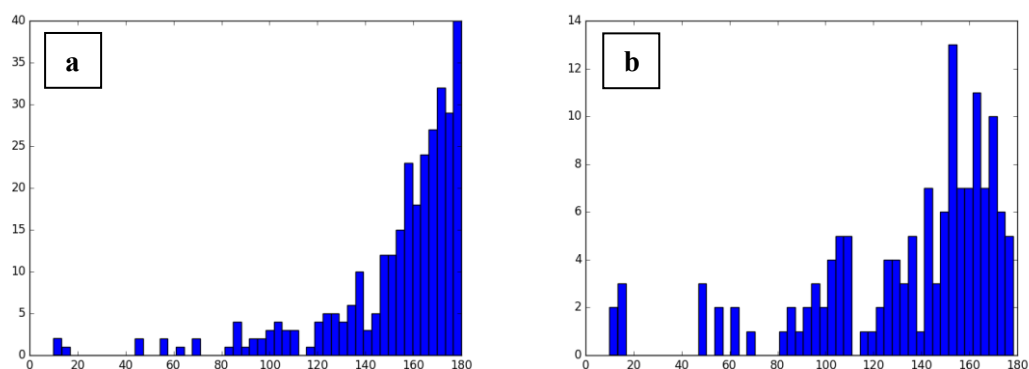
$$\cos \alpha = \frac{u \cdot v}{|u| \cdot |v|}, \quad (3.12)$$

kde  $u = P_{i-1} - P_i$  a  $v = P_{i+1} - P_i$  jsou směrové vektory. Vrstevnice by měly mít plynulý průběh bez oscilací a ostrých hran. U ideálních vrstevnic lze očekávat velký počet segmentů, které svírají tupý úhel, zpravidla větší než  $160^\circ$ . Toto tvrzení potvrzuje i distribuce úhlů mezi segmenty u vrstevnic poskytnutých od Zeměměřického úřadu (viz Obr. 3.19).



Obr. 3.19: Histogram distribuce úhlů mezi segmenty vrstevnic poskytnutých od Zeměměřického úřadu.

Vhodná distribuce úhlů mezi sousedními segmenty u generalizovaných vrstevnic je zobrazena na obrázku 3.20a. Příklad méně vhodné distribuce tohoto kritéria je zobrazen na obrázku 3.20b, kde je příliš velký počet segmentů svírajících úhel menší než  $160^\circ$ .



Obr. 3.20: Histogram distribuce úhlů mezi sousedními segmenty, a – vhodné rozdělení, b – nevhodné rozdělení.

### Polohová chyba

U generalizovaných vrstevnic lze zjišťovat i polohovou chybu pomocí prostorového vztahu k referenční vrstevnici. Hodnoty mohou být zjišťovány pro celou generalizovanou vrstevnici nebo pouze pro vybraný segment generalizované vrstevnice. Možné metody pro hodnocení polohové odchylky tzv. displacementu, prezentuje McMaster (1986):

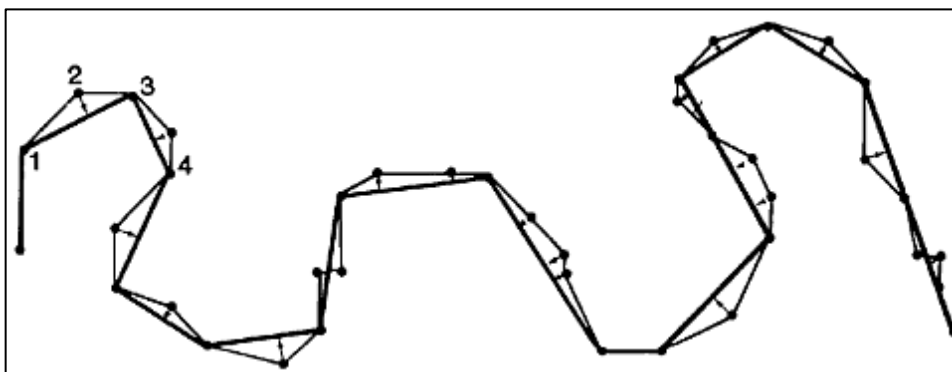
#### Positional displacement

Od každého vrcholu původní vrstevnice je vypočítána orientovaná vzdálenost k příslušnému segmentu generalizované vrstevnice (viz Obr. 3.21). Kladná hodnota značí, že je bod vlevo od segmentu, záporná, že je bod vpravo od segmentu.

Celkový positional displacement  $V$  je vypočítán z následujícího vztahu

$$V = \frac{\sum_{i=1}^m l_i}{\sum_{j=1}^{n-1} s(j)}, \quad (3.13)$$

kde  $m$  je celkový počet vektorů,  $n$  je počet segmentů referenční vrstevnice,  $l$  je délka jednoho vektoru a  $s$  je délka jednoho segmentu referenční vrstevnice.



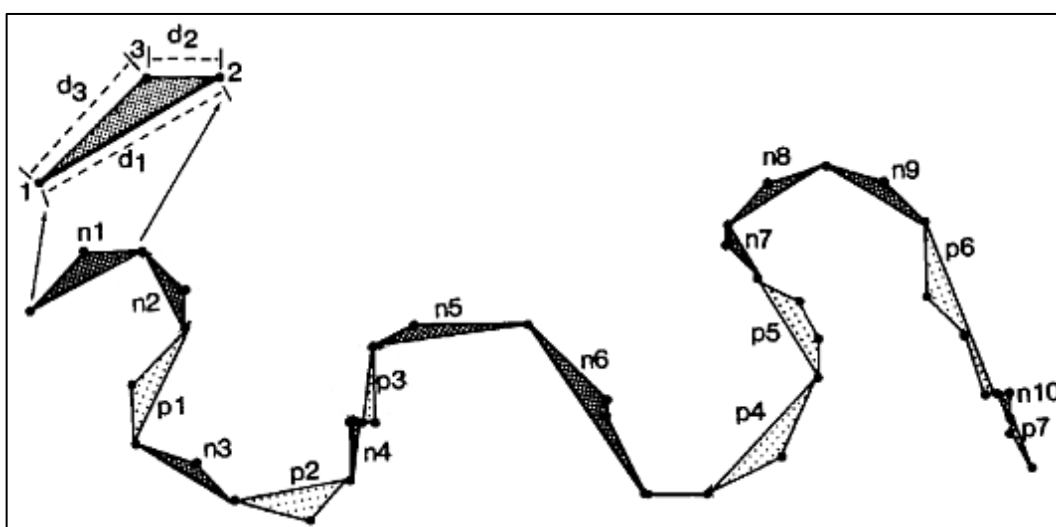
Obr. 3.21: Positional displacement. Zdroj: McMaster (1986)

### Area displacement

Mezi generalizovanou a referenční vrstevnicí vznikají polygony, součet jejich orientovaných ploch (vlevo/vpravo od generalizovaného segmentu) představuje area displacement (viz Obr. 3.22). Určíme ho z následujícího vztahu

$$A = \frac{\sum_{i=1}^p a_i}{\sum_{j=1}^{n-1} s(j)}, \quad (3.14)$$

kde  $p$  je počet polygonů,  $a$  je plocha jednoho polygonu,  $n$  je počet segmentů referenční vrstevnice a  $s$  je délka jednoho segmentu referenční vrstevnice.



Obr. 3.22: Area displacement. Zdroj: McMaster (1986)

### Výšková chyba

S polohovou chybou přímo souvisí i výšková chyba. U generalizované vrstevnice segmenty prochází mimo rovinu řezu terénu, kterou reprezentovala referenční vrstevnice. V praxi tedy u generalizovaných vrstevnic nedochází ke spojení bodů o stejné hodnotě nadmořské výšky.

Používáme-li pro generování vrstevnic lineární model na bázi TIN, který je tvořený mnohostěnem, vzniklý Delauny triangulací  $T$ , pak extrémní výšková chyba segmentu  $e = (A, B)$  vzniká v místech, kde tento segment protíná stranu některého z trojúhelníků  $t$  náležícího  $T$ . Označme množinu protnutých trojúhelníků jako  $T'$ , kde  $T'$  je podmnožinou  $T$  a  $t'$  libovolný trojúhelník náležící  $T'$ , hranu trojúhelníku  $t'$  protnutou segmentem jako  $e = (P, Q)$ , kde  $P = [x_p, y_p, z_p]$ ,  $Q = [x_q, y_q, z_q]$ . Výšku  $z_i$  průsečíku  $I = [x_i, y_i]$  určíme lineární interpolací

$$z_i = z_p + \frac{d(P, I)}{d(P, Q)}(z_q - z_p). \quad (3.15)$$

Výškovou chybu  $j$ -tého segmentu  $e_j$  vrstevnice určíme jako maximální hodnotu výškové chyby nad všemi hranami protnutých trojúhelníků

$$m_{z,j} = \max_{\forall t' \in T'} |z - z_i|. \quad (3.16)$$

Pokud je vrstevnice  $v$  tvořena  $n-1$  segmenty  $e_j$ , celková výšková chyba vrstevnice  $m_z$  je

$$m_z = \max_{\forall e_i \in v} m_{z,j}. \quad (3.17)$$

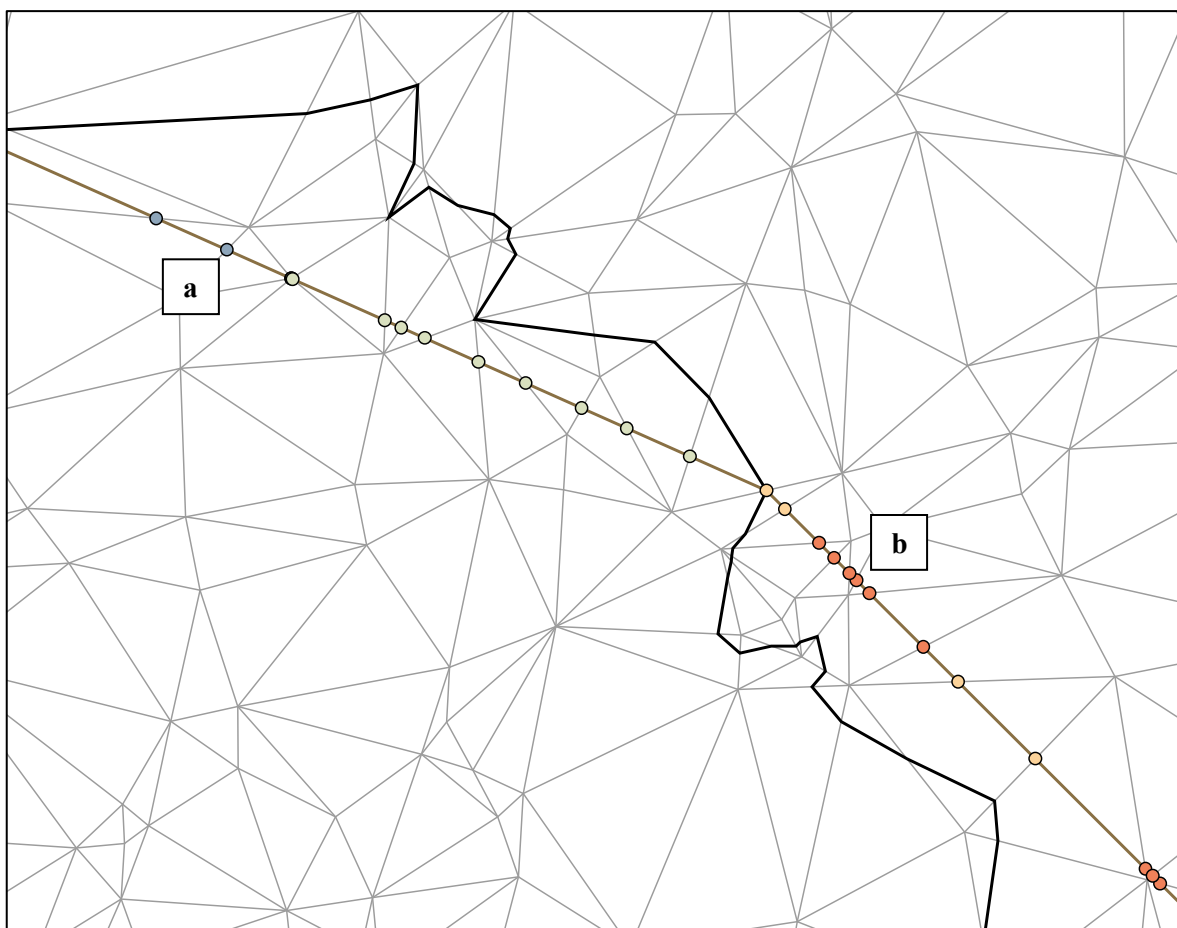
### 3.5.3 Kartografická reprezentace chyb vrstevnic

Pro kartografické znázornění polohové chyby byla zvolena metoda bodových znaků, které jsou lokalizovány ve vrcholech referenční vrstevnice. Hodnota polohové chyby je znázorněna pomocí sytosti barvy znaku a tón barvy znázorňuje kladnou nebo zápornou hodnotu (viz Obr. 3.23). Body nacházející se vpravo od vrstevnice mají hodnoty kladné a body nacházející se vlevo od vrstevnice mají hodnoty záporné. Tato zobrazovací metoda byla vybrána, protože umožňuje snadno a přehledně graficky reprezentovat číselnou hodnotu chyby pro každý vrchol. Existují i další kartografické prostředky, např. metoda izolinií, spojující místa se stejnou chybou, popř. vizualizace vektorů posunu generalizovaného segmentu k vrstevnici. Alternativně lze využít i kartogram pro polygony v prostoru mezi referenční a generalizovanou vrstevnicí. Nevýhodou vizualizace vektorů je ještě větší zaplnění mapy a horší čitelnost. Metoda kartogramu je přehlednější, ale může zobrazit pouze jednu hodnotu pro všechny analyzované body, např. průměr, minimum nebo maximum.



Obr. 3.23: Polohová chyba, generalizovaná vrstevnice (hnědě), referenční vrstevnice (černě), a – velká polohová chyba, b – minimální polohová chyba.

Výšková chyba je kartograficky reprezentována metodou bodových znaků, které jsou lokalizovány do průsečíků generalizovaného segmentů a hran trojúhelníků  $T'$ . Sytost barvy udává míru výškové chyby a tón barvy určuje, zda je generalizovaná vrstevnice nad nebo pod digitálním modelem terénu (viz Obr. 3.24). Body nacházející se bod digitálním modelem terénu nabývají záporných hodnot výškové chyby, kladná hodnota výškové chyby je u bodů, které jsou nad digitálním modelem terénu.



Obr. 3.24: Detail výškové chyby, generalizovaná vrstevnice (hnědě), referenční vrstevnice (černě), a – záporná výšková chyba, b – kladná výšková chyba.

Mezi nevýhodu bodové reprezentace se řadí nemožnost využití na velká území, kde dochází ke slévání bodů a ztrátě informace. Výsledek lze zlepšit odstraněním obrysové čáry kolem bodového prvku. Takto upravená reprezentace byla využita v diplomové práci.



## 4 Kartografická generalizace vrstevnic

Kartografická generalizace představuje častou operaci, která je prováděna při přechodu mezi dvěma měřítkovými čísly map. V cílové mapě, do které generalizujeme, nelze zachovat všechny informace z mapy zdrojové, tj. původní. Je tedy nutné provést nějakou formu výběru a nalézt vhodnou podmnožinu objektů, které je třeba zachovat.

Ve většině případů aplikace jedné generalizační operace vyvolává generalizaci dalších prvků mapy. Generalizací dochází k nenávratné ztrátě informace, je určitou formou kartografické komprese dat. Nedílným faktorem ovlivňující míru a způsob provedení generalizace představuje osoba kartografa. S rozvojem digitální kartografie může být subjektivní pohled kartografa postupně stále více automatizován. Dochází k algoritmizaci jednotlivých generalizačních procesů (Veverka, Zimová, 2008).

Výškopis, který je v topografických mapách vyjádřen zpravidla metodou vrstevnic, popř. kombinován s doplňkovou metodou (např. stínováním), je důležitým obsahovým prvkem mapy. Jeho generalizace je netriviálním problémem, který je v kartografii dlouhodobě řešen.

V této práci jsou navrženy metody kartografické generalizace vrstevnic se zachováním maximální výškové chyby u generalizované vrstevnice. K tomuto účelu je využit výškový buffer, jehož šířka odpovídá hodnotě maximální výškové chyby. Vrstevnice, která se nachází uvnitř takového bufferu, splňuje stanovený požadavek na maximální výškovou chybu.

V kapitole 4.1 je popsána problematika kartografické generalizace v obecné formě, podrobněji jsou diskutovány zejména operace používané při kartografické generalizaci polylinií. Kapitola 4.2 je stěžejní kapitolou této práce a jsou v ní popsány navržené metody generalizace vrstevnic, a to metoda váženého průměrování (viz kap. 4.2.4), metoda modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu (viz kap. 4.2.5) a metoda založená na výpočtu potenciálu (viz kap. 4.2.6). Kapitola 4.3 se věnuje postprocesingu vrstevnic metodou vyhlazení, tak aby byl zlepšený kartograficko-estetický vjem mapy.

### 4.1 Kartografická generalizace

Nejprve se stručně podívejme na problematiku vlastní kartografické generalizace. Existuje mnoho různých definic tohoto pojmu. Podle ČSN 73 046 je kartografická generalizace definována následovně: „Kartografická generalizace spočívá ve výběru,

*geometrickém zjednodušení a zevšeobecnění objektů, jevů a jejich vzájemných vztahů pro jejich grafické vyjádření v mapě, ovlivněné účelem, měřítkem mapy a vlastním předmětem kartografického znázorňování.*“ ICA (International Cartographic Association) definuje kartografickou generalizaci takto: „*The selection and simplified representation of detail appropriate to the scale and/or the purpose of a map.*“ Definice generalizaci popisuje jako proces výběru prvků a zjednodušení reprezentace detailů těchto prvků ve vztahu k měřítku a účelu mapy. Je patrné, že hlavními činiteli generalizace je právě měřítko mapy a účel mapy. Veverka a Zimová (2008) uvádějí 4 základní faktory:

- **Účel mapy**

Určuje především váhu významu jednotlivých obsahových prvků mapy, a tím i míru jejich výběru a přípustného zjednodušení. U topografických map se generalizují všechny obsahové složky s podobnou mírou generalizace, u tematických map se nejvyšší míra podrobnosti přisuzuje prvkům dominantním z hlediska účelu mapy, ostatní obsahové prvky jsou více generalizovány.

- **Měřítko mapy**

Je základním rozhodujícím činitelem při stanovení výběru prvků. Určuje též míru podrobnosti jejich znázornění, prahové hodnoty pro jejich vyjádření. Menší měřítko (tj. větší zmenšení) zákonitě vede ke snížení kapacitní schopnosti mapy.

- **Charakteristiky vyjadřujícího prostoru**

Každou skutečnost zobrazenou v mapě je třeba vidět a hodnotit v širším pohledu. Souhrn vzájemných vazeb mezi mapovanými objekty vytváří určité a v podstatě neopakovatelné prostředí, makrostrukturu, kterou je nutno objektivně reprodukovat. Čím důležitější je v daném kontextu určitá skutečnost, tím naléhavější je potřeba jejího zachování při postupné generalizaci mapované předlohy.

- **Kartografické vyjadřující prostředky**

Podstata tohoto činitele kartografické generalizace je snadno patrná, souvisí s kapacitní schopností mapy. Čím jsou vyjadřovací prostředky

hrubší, plošně náročnější, tím méně informací může mapa vyjádřit, a tedy tím více musí být její obsah generalizován. Pro generalizaci kartografických vyjadřujících prostředků se využívají metody konceptuální generalizace (kap. 4.1.1.1).

### **4.1.1 Metody generalizace**

V kartografii existují dva hlavní přístupy ke generalizaci – konceptuální generalizace a geometrická generalizace. Geometrická generalizace upravuje jednotlivé parametry znaku, zatímco konceptuální generalizace mění znakový klíč mapy. Metoda navržená v práci využívá hlavně geometrickou generalizaci liniových prvků.

#### **4.1.1.1 Konceptuální generalizace**

Při konceptuální generalizaci se kartograf zabývá vlastnostmi znázorňovaných jevů. Aplikací metod konceptuální generalizace dochází ke změně znakového klíče mapy. Z toho vyplývá, že nejdůležitějším kritériem generalizace je v tomto případě účel mapy. Často je potřeba i pomoc odborníka z oboru, pro který je mapa určena. Mezi nejčastěji používané metody konceptuální generalizace patří:

- **Cenzální výběr**

Při cenzálním výběru je stanovena kvalitativní nebo kvantitativní hranice, tzv. cenzusu, od níž se v mapě zobrazí veškeré prvky reality. Prvky, které tuto hranici nesplňují, se v mapě nezobrazí. Jako kvantitativní hranici pro zobrazení lze uvést například zobrazení sídel se stanoveným minimálním počtem obyvatel. Při kvalitativním cenzálním výběru by byla například zobrazena jen sídla, která jsou správními centry.

- **Sloučení**

Při sloučení dochází ke zmenšení kvalitativních rozdílů v dané kategorii. Do nové skupiny jsou zařazeny všechny objekty s podobnými kvalitativními rozdíly a se společnou charakteristikou dané skupiny.

- **Symbolizace**

Při resymbolizaci dochází ke spojování stejnorodých prvků do jednoho, představuje formu kartografické abstrakce. Nejčastěji dochází u objektů zobrazených plošnými kartografickými znaky k nahrazení liniovými nebo

bodovými znaky. Například město, kde od určitého měřítka nelze zobrazit zástavbu jednotlivými budovami, polygony budov jsou agregovány a následně nahrazeny bodovým kartografickým znakem. Podobně je místo břehovek definujících vodní tok použita pouze linie reprezentující průběh toku.

#### **4.1.1.2 Geometrická generalizace**

Při geometrické generalizaci dochází k úpravám geometrických a grafických parametrů kartografických znaků. Pro takové úpravy není potřeba hlubší znalosti účelu mapy. Diplomová práce se zabývá generalizací vrstevnic, které jsou v mapě chápány jako liniový kartografický znak, proto jsou níže popsány procesy generalizace aplikovatelné na liniové prvky v digitální kartografii (viz Tab. 4.1) (Li a Wong, 2008). Níže jsou uvedeny nejvýznamnější generalizační operátory použitelné pro tento typ prvku:

##### **Přesun (Displacement)**

Přesunutí liniového prvku vybraným směrem. Provádí se v případě, kdy dochází ke slévání jednotlivých prvků. Přesun je zpravidla aplikován na objekty s menší prioritou zachování polohy u objektu s vyšší prioritou se jejich poloha nemění. Jako příklad lze použít cyklostezku rovnoběžnou se silnicí, cyklostezka má nižší prioritu a bude tedy přesunuta.

##### **Eliminace (Elimination)**

Odstranění liniového prvku, který je příliš krátký, má malou plochu, či je nevýznamný. Příkladem může být odstranění doplňkových vrstevnic, které jsou vzhledem k měřítku cílové mapy příliš malé pro to, aby byly v mapě zachovány.

##### **Měřítkově závislá generalizace (Scale driven generalization)**

Vytvoření nového liniového prvku z původního prvku, při zachování tvarové charakteristiky, jeho parametry jsou odvozeny pro konkrétní měřítko. Při každé změně měřítka je tedy upraven tvar prvku, předpokládá se plynulá změna měřítkového čísla. Příkladem může být zjednodušení průběhu říčního toku.

##### **Částečný posun (Partial Modification)**

Posun prvků, tak aby byl uchován jejich vzájemný prostorový vztah. Tato operace vzniká jako důsledek grafického slití částí prvků. Částečný posun lze aplikovat např. na silnici, která při změně měřítka zasahuje do blízkého vodního toku.

### Redukce počtu bodů (Points reduction)

Odstranění přebytečných vrcholů liniového prvku, tak aby byly zachovány body nutné k dostatečné reprezentaci tvaru prvku. Redukce počtu bodů je nejčastější geometrická generalizace aplikovaná na liniové prvky, využívá se při zjednodušení průběhu přírodních prvků (např. vodní toky nebo vrstevnice) i antropogenních prvků (např. komunikace).




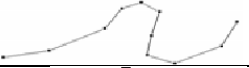
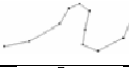










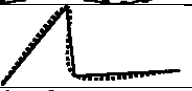





### Vyhlazení (Smoothing)

Prvek je upraven, tak aby se jevil vizuálně hladší, a nedocházelo u něj k ostrým lomům. Vyhlazení se používá pro zlepšení estetického vjemu u vrstevnic, břehovek či komunikací.

### Typizace (Typification)

Odstranění částí liniového prvku při zachování vzoru, resp. jeho tvarových charakteristik. Příkladem může být zjednodušení průběhu říčního toku s meandry se zachováním typického zvlnění linie.

Pro dosažení co nejlepšího tvaru liniového prvku, je nutné při generalizaci aplikovat kombinaci výše uvedených metod. Pro generalizaci vrstevnic představenou v této práci se používají operace eliminace, redukce počtu bodů a vyhlazení.

Operace	Velké měřítko	Grafické zmenšení	Malé měřítko
Přesun			
Eliminace			
Měřítkově závislá generalizace			
Částečný posun			
Redukce počtu bodů			
Vyhlazení			
Typizace			

Tab. 4.1: Metody geometrické generalizace u liniových prvků. Zdroj: Li a Wong (2008)

### 4.1.2 Automatizace kartografické generalizace

Automatizování jednotlivých generalizačních operátorů je od 60. let 20. století cílem zkoumání nejen kartografů a geografů, ale také informatiků, matematiků i psychologů. Jedná se o proces, který je z pohledů informatiky fuzzy, s mnohdy nejasnými pravidly,

u kterých zpravidla neexistuje exaktní hodnocení. Existuje tedy řada přístupů a strategií, žádná z nich však není univerzálně použitelná. Zpravidla pro konkrétní kartografickou situaci volíme konkrétní generalizační operátor. Důvody, proč nebylo dosaženo ideálního stavu automatizace kartografické generalizace, uvádí Yan (2019):

- Prvky a reliéf v trojrozměrném geografickém prostoru jsou rozmanité a komplikované, z toho důvodu je náročné tyto tvary matematicky popsat a vyjádřit ve dvojrozměrném prostoru mapy.
- Automatická generalizace je simulací klasické manuální generalizace, avšak právě při tradiční generalizaci se výsledné mapy liší individuálním přístupem kartografa i v případě, že mají k dispozici stejné podklady. Z tohoto důvodu není snadné přesně popsat, kvalifikovat i kvantifikovat postup generalizace pro konkrétní mapový prvek a následně nalézt nějaké hodnotící kritérium.
- Proces generalizace je ovlivněn lidským vnímáním a rozpoznáváním. Vědci však doposud neumí spolehlivě vysvětlit mechanismus, jakým kartograf ke generalizaci přistupuje a jak ji prakticky realizuje.

Při řešení geometrických vlastností prvků v mapě a jejich následné generalizaci často nejsou splněny některé kartografické požadavky, to zejména vzhled prvku (hladkost, plynulost), popř. vzájemné interakce sousedních prvků. Mezi nově rozvíjející se přístupy patří strojové učení, které hlubší strukturu a hodnocení těchto vztahů a návrh řešení nechává na umělé inteligenci.

V práci navržené řešení využívá geometrické vlastnosti vrstevnice a vzájemný vztah s výškovým bufferem ve snaze dodržet kartografické vlastnosti vrstevnic a zadaná kritéria pro maximální výškovou chybu. Tvar generalizovaného prvku se snažíme vylepšit jeho dodatečným vyhlazením.

## 4.2 Návrh metodiky pro generalizaci vrstevnic

V této kapitole bude představen návrh metody pro automatizovanou kartografickou generalizaci vrstevnic. Metoda je zaměřena na topografické mapy velkých měřítek, kdy i generalizované vrstevnice mohou mít komplikovanější průběh, tj. nejsou tak tvarově zcela vyhlazeny jako vrstevnice v mapách středních měřítek. Předpokládané měřítkové číslo mapy, do kterého se generalizuje, je 1 : 10 000. Metoda je však použitelná po drobné úpravě i pro jiná měřítková čísla.

Jak již bylo uvedeno výše, z kartografického pohledu spadá do kategorie grafické (geometrické) generalizace a využívá zejména operátory: eliminace, redukce počtu bodů a vyhlazení.

Stručný popis navržené metody lze provést takto. Ze surové nebo zředěné množiny vstupních dat (lze použít např. metodu clusterizace) byly metodou lineární interpolace vygenerovány vrstevnice (lze však použít i předem vytvořené vrstevnice), vstupní polyedrický model byl vytvořen Delaunay triangulací. Pro každou z vrstevnic byl vygenerován výškový buffer, uvnitř kterého byla provedena vlastní generalizace. V práci jsou představeny tři metody, a to metoda průměrování, modifikovaný Douglas-Peuckerův algoritmus a metoda generalizačního potenciálu. Na generalizované vrstevnice byl následně aplikován vyhlazovací algoritmus, který upravil křivost vrstevnic v jednotlivých vrcholech.

Navrženou metodu generalizace vrstevnic lze rozdělit do tří hlavních kroků:

- **Ředění DMT**

Aplikace vhodné metody ředění DMT sníží prostorovou hustotu vstupních dat. Pro bodové mračno lze použít např. metody clusterování (facility location). Tento krok není nutný pro správnou funkčnost navržených algoritmů, snižuje oscilaci vrstevnic v rovinatých územích a zlepšuje tak kvalitu vytvořených výstupů. Výhodou redukce vstupních dat je také snížení výpočetní náročnosti následující generalizace.

- **Vlastní kartografická generalizace vrstevnic**

Kartografická generalizace vrstevnic je hlavním cílem této práce. Pro tento účel byly navrženy tři metody. Obě metody se snaží zachovat stanovenou maximální výškovou chybu za použití výškového bufferu. První metoda využívá váženého průměrování (viz kap. 4.2.4), druhá metoda modifikuje Douglas-Peuckerův algoritmus a pomocí rekurzivního zpracování generalizuje úseky vrstevnice (viz kap. 4.2.5). Poslední navržená metoda využívá pro generalizaci vrstevnic tzv. generalizační potenciál bodu. Potenciál je počítán pro každou trojici vrcholů. Trojice vrcholů s největším potenciálem je generalizována eliminováním prostředního vrcholu; metoda je popsána v kapitole 4.2.6.

Pro získání lepších výsledků je vhodné předzpracování dat spočívající v odstranění vrstevnic a hran výškového bufferu s nevhodnými parametry. Mezi tyto parametry patří minimální délka otevřených a minimální plocha uzavřených linií.

- **Vyhlazení vrstevnic**

Kartograficky vhodnějšího a estetičtějšího výsledku je dosaženo aplikací vyhlazovacího algoritmu. V práci je implementován Chaikinskův algoritmus, který je doplněn kontrolami pro možné protnutí vyhlazené vrstevnice s výškovým bufferem. Díky této modifikaci je dodržen požadavek pro maximální výškovou chybu.

Metody byly navrženy tak, aby byly vhodné i pro vstupní data, která neprošla předzpracováním (bodové mračno, TIN, rastr).

Jednotlivé metody budou v práci popsány postupně, poslední metoda, metoda potenciálu, se jeví jako kartograficky nejvhodnější, naznačuje možnosti dalšího využití. Všechny metody využívají princip geometrické generalizace při dodržení maximální povolené výškové chyby, která je vstupním parametrem navrženého kartografického generalizačního algoritmu.

#### **4.2.1 Požadavky kladené na generalizační metody**

Předpoklady, které by měla navržená generalizační metoda splňovat, vycházejí z kartografických vlastností vrstevnic popsaných v kap. 3.2. Kromě kartografických pravidel, v textu značených jako P1-P6, jsou na výsledné vrstevnice kladeny také požadavky geometrického charakteru, v textu označené jako G1-G3 (viz kap. 3.3), s cílem, aby výsledná linie byla z kartografického, geometrického i estetického pohledu vhodná pro vybranou mapu. Syntézou obou skupin definujeme kritéria, které by měl splňovat generalizační algoritmus.

- Navržené metody lze aplikovat na vstupní data v podobě bodového mračna, ze kterého je vytvořen vrstevnicový model s výškovým bufferem, nebo na již existující vrstevnice s vygenerovaným výškovým bufferem.
- Navržené metody by měly být vhodné pro generalizaci vrstevnic v rovinných územích, ale zároveň je možné je použít pro generalizaci vrstevnic v územích s větším sklonem.
- Navržené metody lze použít pro generalizaci uzavřených i otevřených vrstevnic.
- Výsledné vrstevnice by měly zachovávat maximální výškovou chybu.
- Vrstevnice by neměly oscilovat, obsahovat příliš krátké nebo dlouhé segmenty, protínat sousední vrstevnice nebo docházet k self-intersection.



- Generalizované vrstevnice by měly být esteticky uspokojivé a vhodné k použití při tvorbě dalších mapových výstupů. Estetické vnímání je subjektivní pro každého čtenáře mapy, a proto může být hodnocení tohoto parametru odlišné.

#### 4.2.2 Ředění DMT

Bodová mračna, ze kterých je vytvářen polyedrický digitální model terénu, mají příliš velkou hustotu. U výsledného terénu může docházet k oversamplingu, což způsobuje u rovinatých území oscilaci vrstevnic. Pro tento účel je vhodné použít vhodnou metodu ředění bodového mračna, např. clusterizaci (viz kap. 2.1).

Navržené metody byly koncipovány tak, aby byly schopné generalizovat i vrstevnice vytvořené přímo z bodového mračna s vysokou prostorovou hustotou. Případné použití vhodně zředěného digitálního modelu terénu by snížilo časovou náročnost generalizačních algoritmů, vstupní vrstevnice by byly tvořeny menším množstvím vrcholů.

#### 4.2.3 Vlastní kartografická generalizace vrstevnic

Cílem této kapitoly, která je stěžejní částí diplomové práce, bylo navržení metody pro automatizovanou kartografickou generalizaci vrstevnic. Vstupními daty může být surové či zředěné bodové mračno, metodu lze aplikovat i na již vytvořené vrstevnice s výškovým bufferem (viz kap. 3.4), uvnitř kterého generalizační operace probíhá.

Navržená metoda je koncipována pro mapy velkých měřítek 1 : 5 000 a 1 : 10 000 a oblasti s převážně rovinatým terénem. Lze ji však využít i pro mapy menšího měřítka, popř. pro generalizaci vrstevnic v oblastech s komplikovanějším reliéfem. Jako vstupní data byl použit DMR5G, podrobnosti jsou uvedeny v kapitole 5.5.

U prezentovaných metod byla snaha respektovat kartografická pravidla popsaná v kapitole 4.2.1, klíčovou roli v tomto bodě hraje výškový buffer (viz kap. 3.4). U generalizované vrstevnice, která leží uvnitř výškového bufferu, je zachována maximální výšková chyba, která je menší než „výška“ bufferu  $dz$ .

Vlastní generalizační algoritmus je tvořen níže uvedenými fázemi:

##### 1. Vytvoření vstupních vrstevnic

Vrstevnice s požadovaným základním intervalem (v práci je s ohledem na cílové měřítko mapy použit 1 m), jsou vytvořeny lineární interpolací z polyedrického digitálního modelu terénu. Jako vstupní vrstevnice mohou být použity i již existující vrstevnice.

## 2. Tvorba výškových bufferů

Výškový buffer lze vygenerovat analogicky, a to metodou lineární interpolace. Alternativně může být použit i již vytvořený buffer. Šířka bufferu odpovídá nastavenému  $k$  násobku základního intervalu vrstevnic, v práci bylo použito  $k = 0.25$ . Šířka bufferu ovlivňuje míru generalizace, problematice výškového bufferu je věnována kapitola 3.4.

## 3. Předzpracování vrstevnic a výškového bufferu

Před vlastní generalizací je provedeno předzpracování vrstevnic a výškového bufferu. Ze vstupní množiny jsou odstraněny vrstevnice a části výškového bufferu, které jsou vzhledem k cílovému měřítku mapy nevhodné, typicky se jedná o vrstevnice v cílovém měřítku kratší než 3 mm, viz kap. 4.2.3.1.

## 4. Kartografická generalizace vrstevnic

Na předzpracované vrstevnice je aplikován navržený generalizační algoritmus. Jak již bylo uvedeno výše, v práci byly použity 3 metody: váženého průměrování (viz kap. 4.2.4), modifikovaný Douglas-Peuckerův algoritmus (viz kap. 4.2.5) a metoda minimalizace potenciálu (viz kap. 4.2.6).

### 4.2.3.1 Předzpracování vrstevnic

Ze vstupního souboru byly odstraněny vrstevnice, které nejsou vzhledem k měřítkovému číslu  $M$  cílové mapy vhodné, aneb nezobrazily by se korektně, popř. by jejich zpracování mohlo přinést problémy. V práci jsme vybrali 3 kritéria, a to minimální délku otevřené i uzavřené vrstevnice a minimální plochu uzavřené vrstevnice. Byly zvoleny hodnoty, odpovídající vztaženému měřítku 1 : 10 000 s cílem, aby nedocházelo ke grafickému slití generalizovaných prvků ve výsledné mapě. Při požadavku minimální délky  $d_{min}$  liniového segmentu 3 mm v měřítku mapy, ve skutečnosti tato hodnota činí

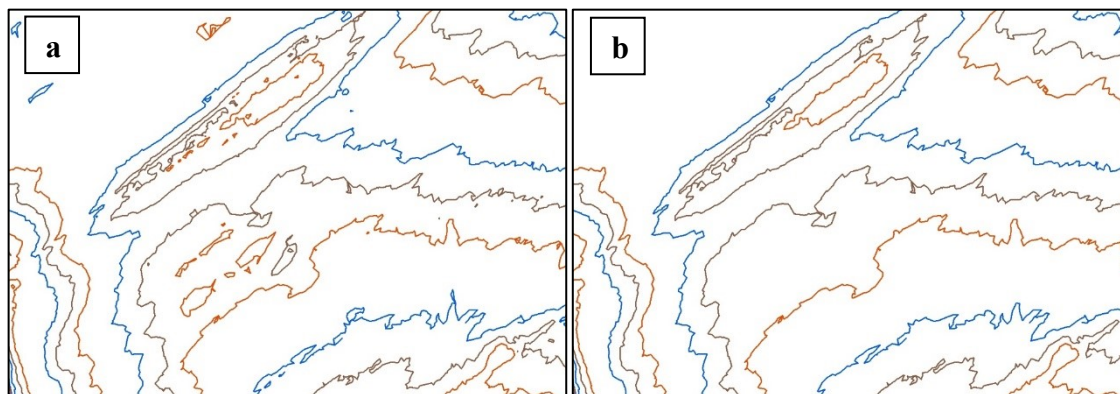
$$D_{min} = M * d_{min} = 30 \text{ m.}$$

Otevřené vrstevnice, jejichž délka je menší než  $D_{min}$ , jsou ze vstupních dat odstraněny. Obdobně postupujeme i u stanovení minimální plochy zobrazitelného objektu. Pokud si objekt představíme jako čtverec se stranou  $d_{min}=2.5 \text{ mm}$ , pak jeho minimální plocha ve skutečnosti činí

$$P_{min} = M^2 * p_{min} = 500 \text{ m}^2.$$

Uzavřené vrstevnice, jejichž plocha je menší než  $P_{min}$ , jsou ze vstupních dat následně odstraněny.

Stejná pravidla jsou aplikována i na jednotlivé elementy výškového bufferu. Ukázka je zobrazena na obrázku 4.1. Tato operace následně ovlivnila výškovou chybu vrstevnic. Některé segmenty nesplňují požadavek výškové chyby, protínají odstraněné segmenty bufferu. V praxi se však tento fakt týká pouze malého množství prvků, cca 1,5 %, viz kap. 6.6.



Obr. 4.1: Vrstevnice a výškový buffer vytvořený z TIN (a), aplikování eliminace malých prvků (b).

#### 4.2.4 Metoda váženého průměrování

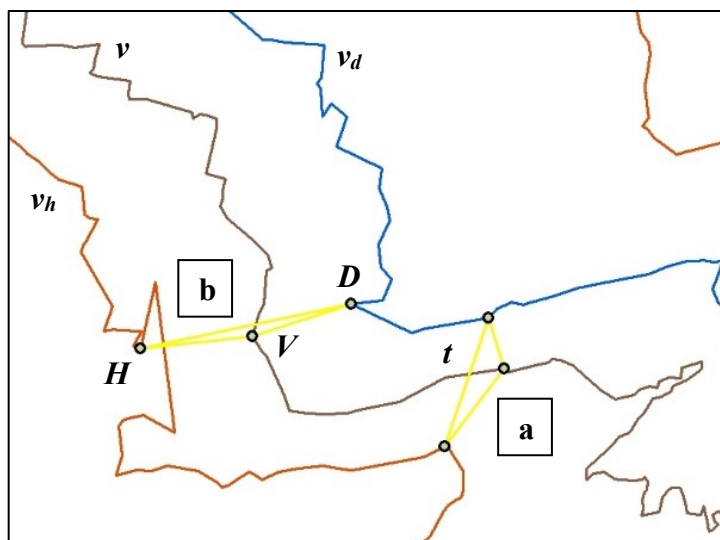
Nová metoda průměrování vychází z metody představené Pickem (2017), který využil ke generalizaci příčky spojující pravou a levou stranu výškového bufferu. Princip původní metody je, že každý bod ležící na takové úsečce splňuje maximální výškovou chybu a její střed je vybrán jako nový bod generalizované vrstevnice.

Modifikovaný přístup představený v této kapitole myšlenku rozšiřuje o možnost využití váženého průměrování s využitím těžiště trojúhelníku nebo mnohoúhelníku. Vrcholy trojúhelníku tvoří lomový bod vstupní vrstevnice  $v$ , nejbližší lomový bod na „horní“ vrstevnici  $v_h$  výškového bufferu  $B$  a nejbližší bod na „dolní“ vrstevnici  $v_d$  výškového bufferu  $B$ .

Postup metody lze stručně popsat takto:

1. Pro každý vrchol  $V$  referenční vrstevnice  $v(z)$  je nalezen nejbližší vrchol  $H$  na „horní“ vrstevnici  $v_h$  a nejbližší vrchol  $D$  na „dolní“ vrstevnici  $v_d$  výškového bufferu  $B_{bz}$  tvořící trojúhelník  $t = \{V, H, D\}$ . Tímto krokem lokálně zjednodušíme tvar výškového bufferu a eliminujeme jeho odlehlé části, které by mohly negativně ovlivnit generalizovanou vrstevnici.

2. Následuje kontrola, zda je celý trojúhelník uvnitř výškového bufferu  $B_{bz}$ . Počet vytvořených trojúhelníků protínající výškový buffer je minimální, ale je nutné provést kontrolu a eliminovat případné nevhodné kandidáty (viz Obr. 4.2).



Obr. 4.2: Vytvoření trojúhelníků z nejbližších bodů, a – korektní trojúhelník, b - chybný trojúhelník.

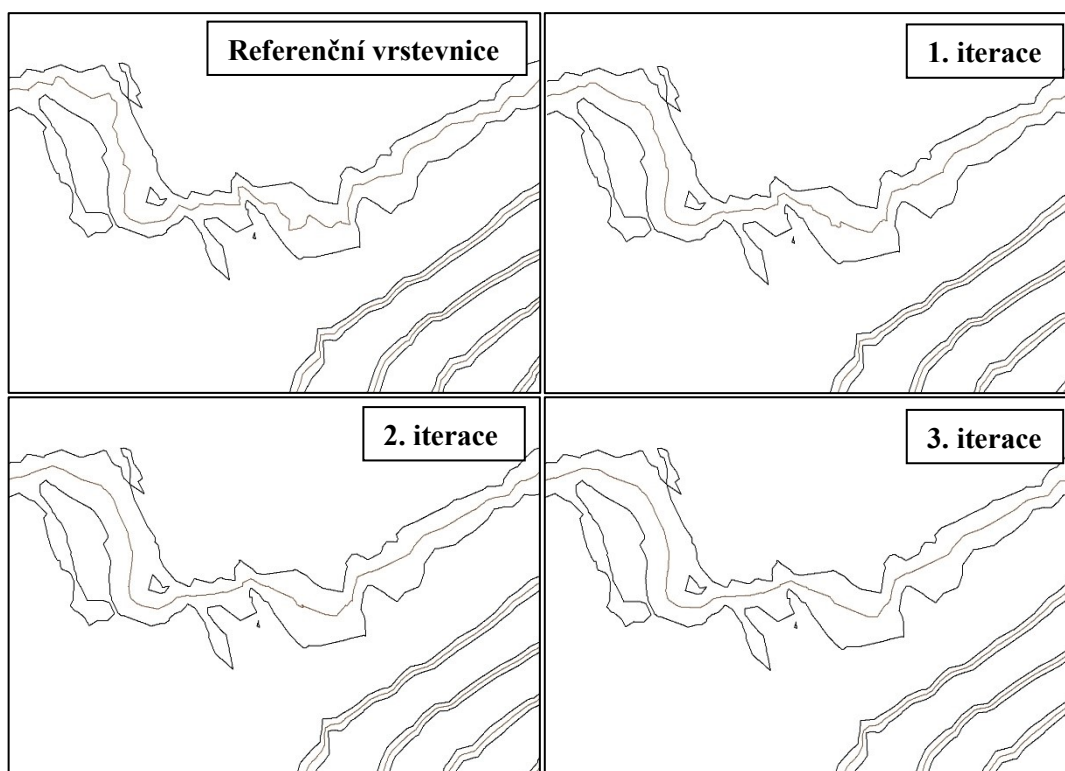
3. Pro každý trojúhelník  $t$  jsou vypočítány souřadnice jeho centroidu  $C$

$$C = \frac{V + H + D}{3}, \quad (4.1)$$

4. Ze vzniklých centroidů je vytvořena nová generalizovaná vrstevnice  $v'$

$$v' = \{C_1, C_2 \dots C_n\}.$$

Pro větší vyhlazení je vhodné aplikovat metodu v několika iteracích, kdy s každou iterací vzniká hladší vrstevnice bez oscilací. Ukázka vytvořené generalizace je zobrazena na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Míra generalizace v závislosti na počtu iterací.

Na obrázku 4.3 je vidět ideální proces generalizace vrstevnic za použití navržené metody. Metoda má však zásadní nevýhodu, která se projevuje zejména v oblastech s komplikovanějším průběhem vrstevnic či širokým výškovým bufferem, což je typické v rovinatých oblastech. Dochází ke vzniku topologických chyb, tzv. self intersections či protnutí výškového bufferu, tedy k nedodržení maximální výškové chyby (viz Obr. 4.4). Chybu by bylo možné odstranit implementací dalších testů a podmínek, což by vedlo k zvýšení výpočetní náročnosti a komplikovanosti metody.



Obr. 4.4: Chyby ve výsledku generalizace metodou průměrování centroidem trojúhelníku, a - originální vrstevnice, b - generalizovaná vrstevnice

Metodu lze dále zobecnit tak, že ke konkrétnímu vrcholu bude hledáno  $k$ -nejbližších bodů na obou vrstevnicích výškového bufferu. Tyto body budou tvořit vrcholy uzavřeného polygonu, jehož centroid určíme ze vztahu

$$C_t = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i, \quad (4.2)$$

do výpočtu centroidu už přímo nevstupuje vrchol vrstevnice. Tento přístup částečně zlepšil vytvořené výsledky, ale vrstevnice stále nesplňovaly požadavky pro zachování maximální výškové chyby, stále také vznikaly self-intersections. Z důvodu těchto nedostatků byla metoda označena jako neperspektivní a v této práci se jí podrobněji nevěnujeme.

#### 4.2.5 Metoda modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu

Druhá navržená metoda kartografické generalizace vychází z Douglas-Peuckerova algoritmu, představuje jeho modifikaci.

Algoritmus představený v této práci modifikuje „klasický“ Douglas-Peuckerův algoritmus využitím výškového bufferu. Koridor o konstantní šířce  $h$  je nahrazen výškovým bufferem  $B$  o výšce  $dz$  s proměnnou šířkou. Podívejme se podrobněji na vlastní princip generalizačního algoritmu, který je popsán v několika krocích.

##### 1. Test uzavřenosti vrstevnice

Ověření, zda je zpracovávaná vrstevnice uzavřená či nikoliv. Pro uzavřenou vrstevnici tvořenou  $n$  vrcholy platí

$$V_1 = V_n.$$

##### 2. Rozdělení vrstevnice

Uzavřenou vrstevnici je nutné rozdělit na více úseků a přistupovat k nim během zpracování samostatně jako k polyliniím. K vytvoření takových polylinií jsou použity vrcholy min-max boxu. Vrstevnice je rozdělena na polylinie, jejichž koncové body se nacházejí v definičních bodech min-max boxu, mají tedy extrémní souřadnice  $x, y$ .

##### 3. Aplikace Douglas-Peuckerova algoritmu

Následující kroky jsou aplikovány na každou vytvořenou polylinii. Douglas-Peuckerův algoritmus je známý tím, že generalizovaný prvek uchovává tvar původního prvku, nezachovává však dobře křivost.

Sousední segmenty  $s$  bývají často příliš dlouhé, což je pro vrstevnice nepřírozané. Nevýhodu odstraníme zavedením dodatečného parametru  $d_{max}$  představujícího maximální délku segmentu, která by v měřítku mapy neměla být větší než 5 mm. Rekurzivní dělení probíhá, dokud délka segmentu není menší než  $d_{max}$ .

Vlastní princip algoritmu lze stručně popsat takto:

Nejprve je vytvořena spojnice  $l$  mezi počátečním vrcholem  $V_1$  a posledním vrcholem  $V_n$  vrstevnice  $v$ . Otestujeme, zda spojnice  $l$  neprotíná hranici výškového bufferu  $B$ , a zda platí vztah

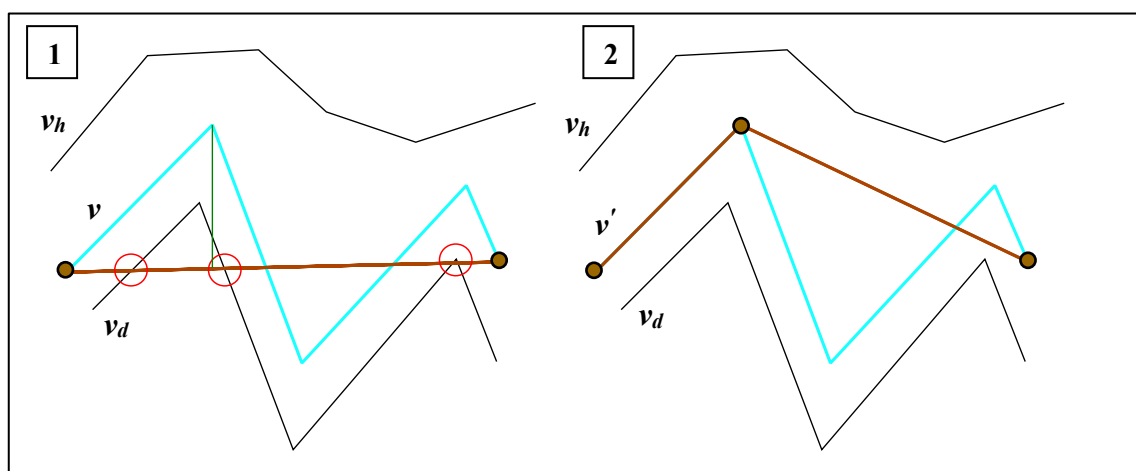
$$l < d_{max}.$$

V případě, že jsou obě podmínky splněny, dojde k ukončení rekurzivního volání. V opačném případě je nalezen kritický bod  $H$ , který je nejvzdálenějším vrcholem vrstevnice  $v$  od vytvořené úsečky  $l$ . Nalezený bod  $H$  je přidán jako vrchol generalizované vrstevnice  $v'$ . Následně je provedeno rekurzivní volání algoritmu pro segmenty  $(V_1, H)$  a  $(H, V_n)$ .

Generalizovaná vrstevnice je tvořena vrcholy

$$v' = \{V_1, H_1, H_2, \dots, H_i, V_n\}.$$

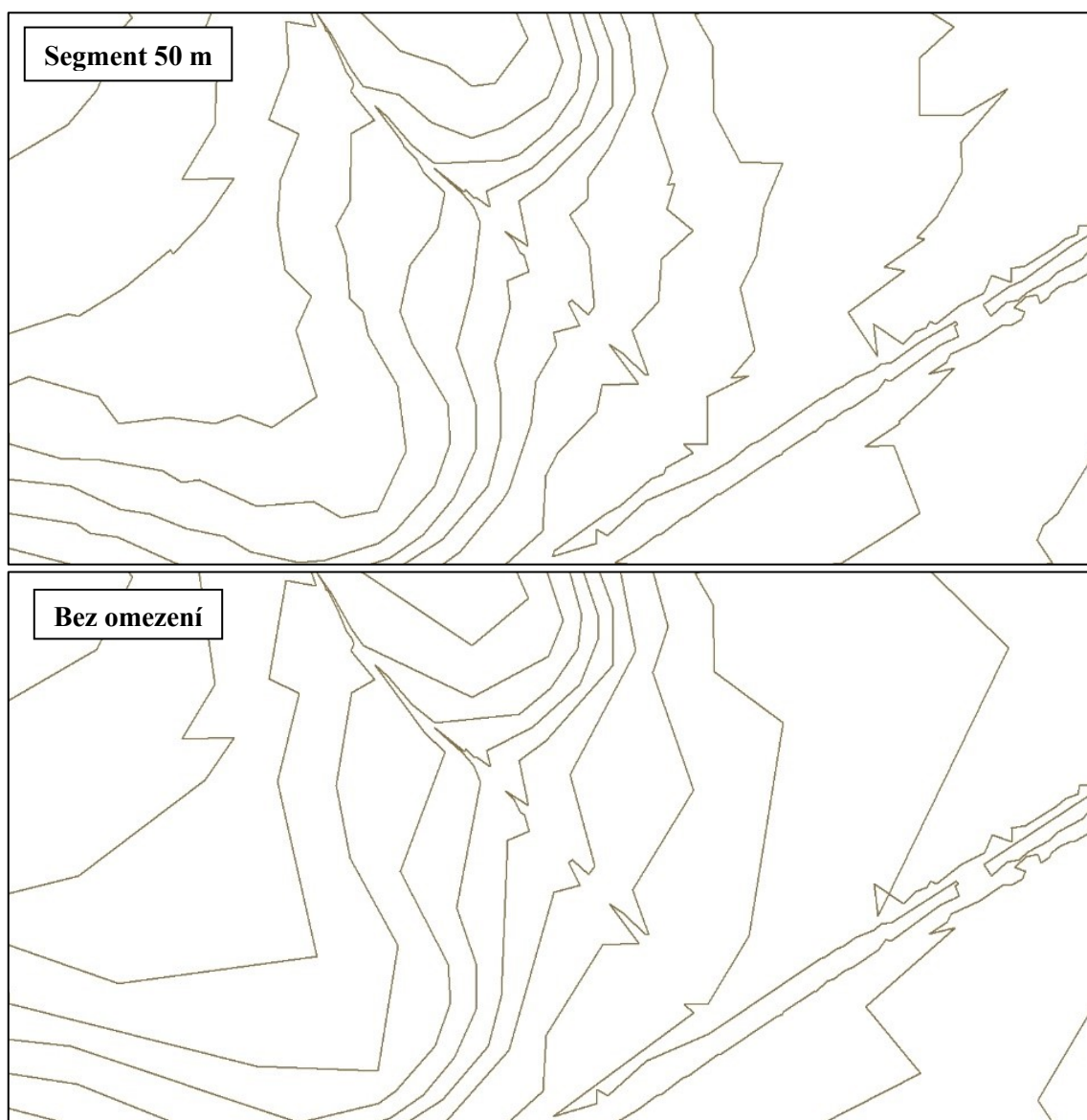
Ukázka principu generalizování pomocí modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu je zobrazena na obrázku 4.5. Implementaci algoritmu ve formě pseudokódu nalezneme v kap. 5.



Obr. 4.5: Postup generalizace pomocí modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu.

Podívejme se podrobněji na vlastnosti této metody. Ve srovnání s předchozím přístupem založeným na průměrování navržený postup generuje méně chyb. Výsledná

vrstevnice je vždy uvnitř výškového bufferu a je tak dodržen požadavek na maximální výškovou chybu. Z kartografického hlediska však dochází u generalizovaných vrstevnic stále k výrazným oscilacím nebo naopak k vytváření různě dlouhých sousedních segmentů, což je typické pro přímé úseky vrstevnic v místech s velkým sklonem. Výstupy generalizace jsou zobrazeny na obrázku 4.6. Základní interval vrstevnic v ukázce je 1 m a velikost výškového bufferu je 0,25 m. Ukazuje se, že ani tato metoda není z kartografického hlediska příliš vhodná pro generalizaci vrstevnic. Z výše uvedeného hodnocení vyplývá, že porušuje zejména kartografická pravidla pro hladkost a spojitost a pravidla topologické korektnosti. Tyto tvarově nevhodné artefakty není možné odstranit ani následným vyhlazením vrstevnice.



*Obr. 4.6: Výsledky generalizace modifikovanou metodou Douglas-Peucker.*



## 4.2.6 Metoda potenciálu

Poslední metoda představená v této práci se snaží eliminovat nedostatky obou výše uvedených metod, zejména generování dlouhých segmentů a segmentů, které se protínají pod ostrým úhlem. Zatímco metoda Douglas-Peuckerova algoritmu vytváří linii postupem shora-dolů, což je efektivní pro zachování tvaru, pro zachování křivosti se budeme snažit použít postup opačný, vytvářet linii směrem zdola-nahoru. Místo přidávání vhodných vrcholů tedy volíme strategii, kdy se snažíme odstranit takové segmenty, které z hlediska tvaru vrstevnice nejsou příliš přínosné, popř. mají nevhodný tvar.

Pro nalezení takových segmentů je navrženo nové kritérium, které je označeno jako **generalizační potenciál bodu**. Je označen jako  $\Pi$  a bude postupně počítáno pro každý vrchol vstupní polylinie.

### Generalizační potenciál

Označme libovolnou trojici vrcholů vstupní polylinie  $\{V_i, V_{i+k}, V_{i+l}\}$ , kde  $k < l$ , vrcholy tedy obecně nemusejí být vrcholy sousedními. V první iteraci algoritmu bude platit, že  $l = k + 1$ , budou tedy tvořit posloupnost tří následujících vrcholů. Základní myšlenka generalizačního algoritmu spočívá v redukci trojice bodů na dvojici, kdy přímo propojíme vrchol  $V_i$  s vrcholem  $V_{i+l}$ , a vynecháme vrchol  $V_{i+k}$  v případě, že bod  $V_{i+k}$  má vhodný generalizační potenciál. Výsledkem je tedy nový segment  $\{V_i, V_{i+l}\}$  (viz Obr. 4.11).

### Úprava notace

Z důvodu přehlednosti upravme notaci do tvaru, využívající systém předchůdců a následníků. Označme vrchol  $V_{i+k}$  jako nástupce vrcholu  $V_i$ , tento fakt zapíšeme jako

$$n(V_i) = V_{i+k},$$

bod  $V_i$  je předchůdcem bodu  $V_{i+k}$

$$p(V_{i+k}) = V_i.$$

Analogicky bude platit, že bod  $V_{i+l}$  je nástupcem bodu  $V_{i+k}$ , bod  $V_{i+l}$  je pak nástupcem nástupce  $V_i$

$$n(n(V_i)) = n(V_{i+k}) = V_{i+l}$$

A bod  $V_{i+k}$  je předchůdcem  $V_{i+l}$ , bod  $V_i$  je předchůdcem předchůdce bodu  $V_{i+l}$

$$p(p(V_{i+l})) = p(V_{i+k}) = V_i.$$

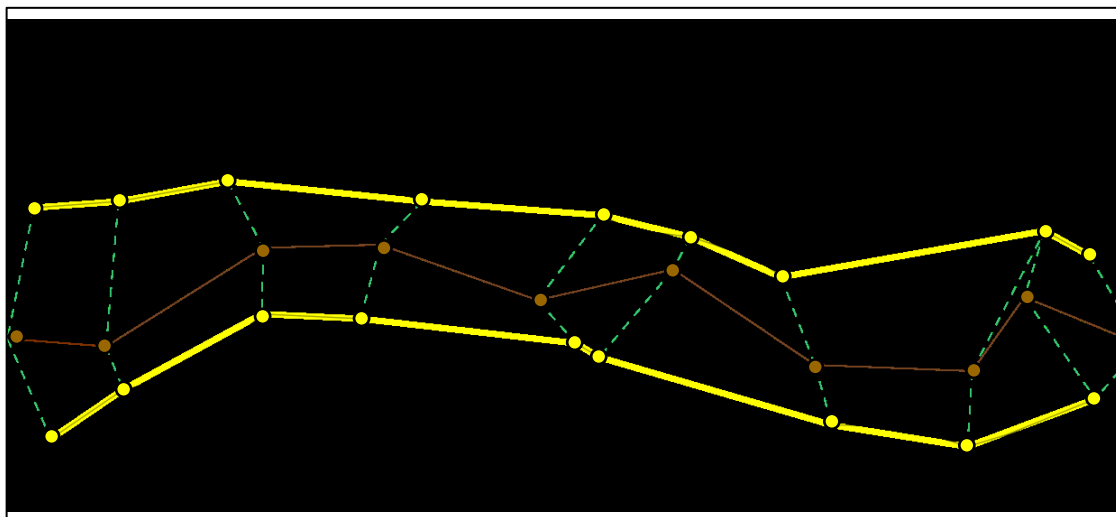
Nově vzniklý segment by měl splňovat některé geometricko-kartografické vlastnosti. Uvedeme dvě základní pravidla týkající se tvorby nového segmentu

- 1) Měl by ležet co nejbližě středu výškového bufferu, tedy být symetricky vzdálen od obou částí výškového bufferu.
- 2) Měl by být aplikován na takové vrcholy  $n(V_i)$ , jejichž příslušející segmenty  $(V_i, n(V_i))$  a  $(n(V_i), n(n(V_i)))$  svírají ostrý úhel a způsobují ostré a nepřirozené lomy.

Zatímco první pravidlo generuje polylinie, které jsou tvarem co nejvíce podobné původní polylinii, druhá varianta eliminuje oscilace a zachovává křivost vrstevnice. Obě pravidla také můžeme vzájemně kombinovat a dosáhnout určitého kompromisu.

### Aproximace bufferu

Při výpočtu potenciálu můžeme použít jak exaktní výškový buffer, tak jeho aproximaci, kdy pro každý generalizovaný bod vrstevnice použijeme pouze nejbližší vrchol na horní a dolní vrstevnici bufferu (viz Obr. 4.7). Tímto krokem provedeme aproximaci bufferu a eliminujeme jeho nevhodné tvarové artefakty, zejména členité výběžky, které negativně ovlivňují tvar vrstevnice. Protože si pro každý bod generalizované vrstevnice můžeme nejbližší body předpočítat, a v průběhu generalizace se tyto hodnoty příliš nemění, můžeme dosáhnout významného snížení výpočetní náročnosti celého postupu.



Obr. 4.7: Aproximovaný výškový buffer (žlutě)

### Výpočet potenciálu z aproximovaného bufferu

První navržená varianta pracuje s nejbližšími vrcholy  $H'(V_i)$ ,  $H'(n(V_i))$  a  $H'(n(n(V_i)))$  na „horní“  $v_h$  a nejbližšími vrcholy  $D'(V_i)$ ,  $D'(n(V_i))$  a  $D'(n(n(V_i)))$  „dolní“  $v_d$  vrstevnici výškového bufferu, které nalezneme postupně ke každému z trojice bodů  $\{V_i, n(V_i), n(n(V_i))\}$  (viz Obr. 4.8). Z důvodu přehlednosti notace libovolný z těchto bodů

označme jako  $H'_j$  resp.  $D'_j$ . Pokud budeme požadovat, aby generalizovaná linie procházela co nejvíce středem koridoru, potenciál bude měřit vzdálenost segmentu  $(V_i, n(n(V_i)))$  od aproximovaného bufferu mezi těmito body. Pokud bude poměr obou délek blízký hodnotě 1, leží generalizovaný segment  $(V_i, n(n(V_i)))$  blízko osy výškového bufferu. Potenciál bodu  $n(V_i)$  lze zapsat ve tvaru

$$\Pi(n(V_i)) = \min\left(\frac{d_h}{d_d}, \frac{d_d}{d_h}\right). \quad (4.3)$$

Můžeme pracovat s průměrnou vzdáleností generalizovaného segmentu od obou částí bufferu (horní a dolní)

$$\begin{aligned} \hat{d}_h &= \frac{1}{l} \cdot \sum_{j=i}^{i+l} \|H'_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \\ \hat{d}_d &= \frac{1}{l} \cdot \sum_{j=i}^{i+l} \|D'_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \end{aligned} \quad (4.4)$$

kde  $H'_j$  je nejbližší bod vrcholu  $V_j$  na horním bufferu a  $D'_j$  nejbližší bod k vrcholu  $V_i$  na dolním bufferu.

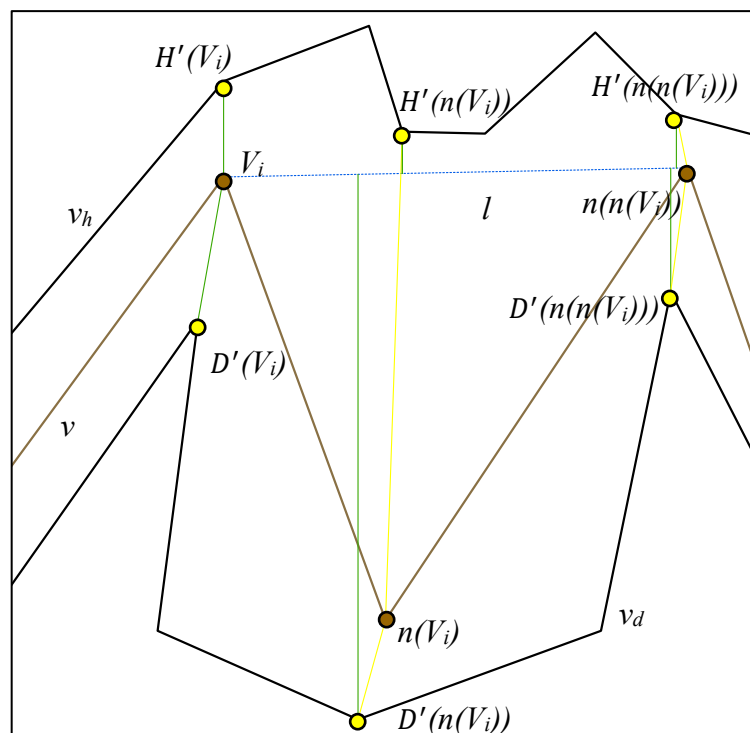
Alternativně lze použít maximum

$$\begin{aligned} \overline{d}_h &= \max_{i \leq j \leq i+l} \|H'_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \\ \overline{d}_d &= \max_{i \leq j \leq i+l} \|D'_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \end{aligned} \quad (4.5)$$

či minimum

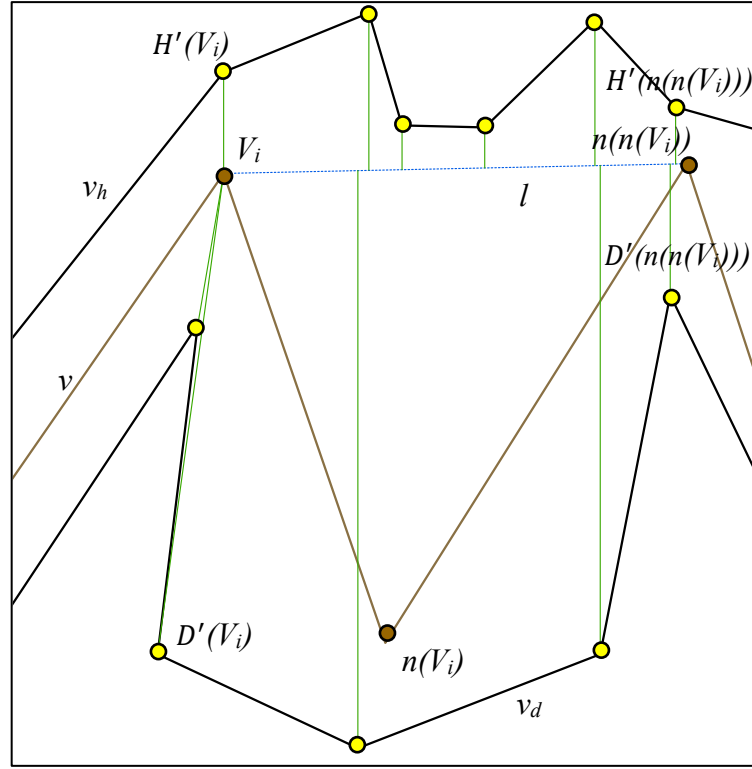
$$\begin{aligned} \underline{d}_h &= \min_{i \leq j \leq i+l} \|H'_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \\ \underline{d}_d &= \min_{i \leq j \leq i+l} \|D'_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \end{aligned} \quad (4.6)$$

z těchto vzdáleností. Symbol podtržítka resp. nadtržítka označuje minimum resp. maximum. Zatímco min metrika má tendenci generovat polylinie přímého tvaru, které redukují možné oscilace, max metrika vytváří polylinie, které svým tvarem korespondují s průběhem výškového bufferu a reflektují jeho extrémy v podobě výběžků. Průměrová metrika generuje polylinii, která plynule prochází středem výškového bufferu a vytváří vyrovnané výsledky. Polylinie reflektuje tvar výškového bufferu, ale potlačuje možné zakřivení v místech, kde výškový buffer vytváří výběžky. Při požadavku vyrovnané míry generalizace je nejvhodnější průměrová metrika. Pokud je požadována větší míra respektování tvaru výškového bufferu, pak je vhodné zvolit max metriku.



Obr. 4.8: Výpočet vzdáleností nejbližších bodů od úsečky mezi prvním a posledním bodem trojice.

Alternativně lze pracovat přímo s bufferem, a nikoliv s jeho aproximací prostřednictvím nejbližších bodů. Původní buffer má komplexnější tvar, což ovlivní i generalizovanou vrstevnici, která bude tvarově členitější. Startovní bod bufferu  $H_i \equiv H'(V_i) = H'_i$  je nejbližším bodem k bodu  $V_i$  na horním bufferu, koncový bod  $H_{i+l} \equiv H(n(n(V_i))) = H'_{i+l}$  je nejbližším bodem k bodu  $n(n(V_i))$  na horním bufferu, a analogicky pro dolní buffer. Pracujeme tedy se všemi mezilehlými body bufferu mezi body  $H'_i$  a  $H'_{i+l}$  (viz Obr. 4.9).



Obr. 4.9: Výpočet vzdáleností všech bodů výškového bufferu podél úsečky.

Pro průměrnou vzdálenost generalizovaného segmentu od horní a dolní části bufferu platí analogické vztahy

$$\begin{aligned}\hat{d}_h &= \frac{1}{l+1} \cdot \sum_{j=i}^{i+l} \|H_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \\ \hat{d}_d &= \frac{1}{l+1} \cdot \sum_{j=i}^{i+l} \|D_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|.\end{aligned}\tag{4.7}$$

Stejný přístup lze použít i pro max metriku

$$\begin{aligned}\bar{d}_h &= \max_{i \leq j \leq i+l} \|H_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \\ \bar{d}_d &= \max_{i \leq j \leq i+l} \|D_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|\end{aligned}\tag{4.8}$$

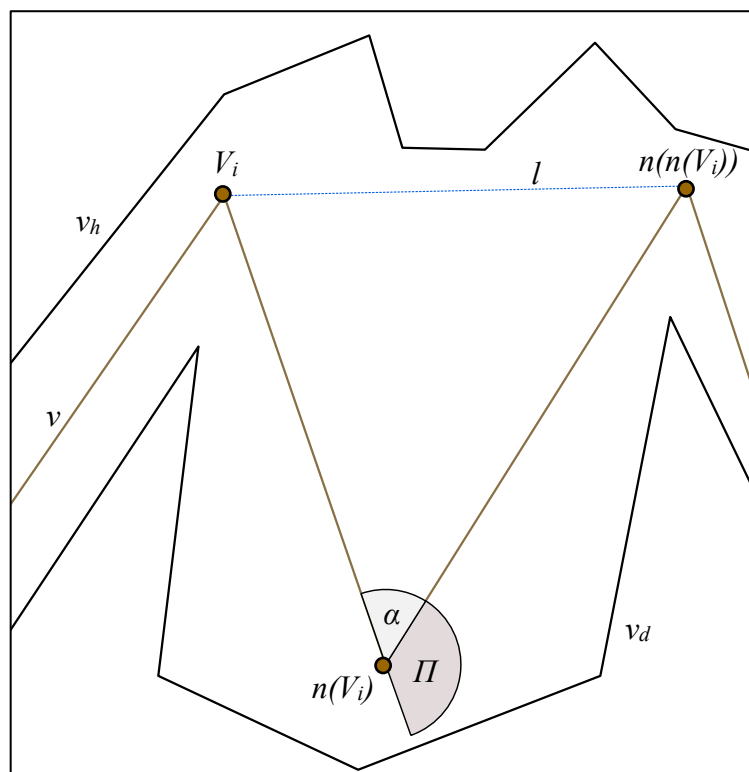
nebo min metriku

$$\begin{aligned}\underline{d}_h &= \min_{i \leq j \leq i+l} \|H_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|, \\ \underline{d}_d &= \min_{i \leq j \leq i+l} \|D_j, \overline{V_i, n(n(V_i))}\|.\end{aligned}\tag{4.9}$$

Třetí metoda výpočtu potenciálu využívá doplňkový úhel  $|\pi - \alpha|$ , mezi segmenty  $(V_i, (V_i))$  a  $(n(V_i), n(n(V_i)))$ , kde  $\alpha$  představuje úhel mezi těmito segmenty (viz Obr. 4.10)

$$\Pi(n(v_i)) = |\pi - \alpha_i|.\tag{4.10}$$

Jako bod  $n(V_i)$  s nejvhodnějším generalizačním potenciálem použijeme takový, který maximalizuje doplňkový úhel. Protože generalizační algoritmus zpracovává body sestupně dle hodnot potenciálu, pracuje v prvních iteracích s takovými segmenty, které se protínají pod ostrými úhly, a způsobují nežádoucí oscilace vrstevnic. Tyto dvojice segmentů pak nahrazuje přímou spojnici.



Obr. 4.10: Výpočet potenciálu z dopočtu úhlu svíraného trojicí bodů.

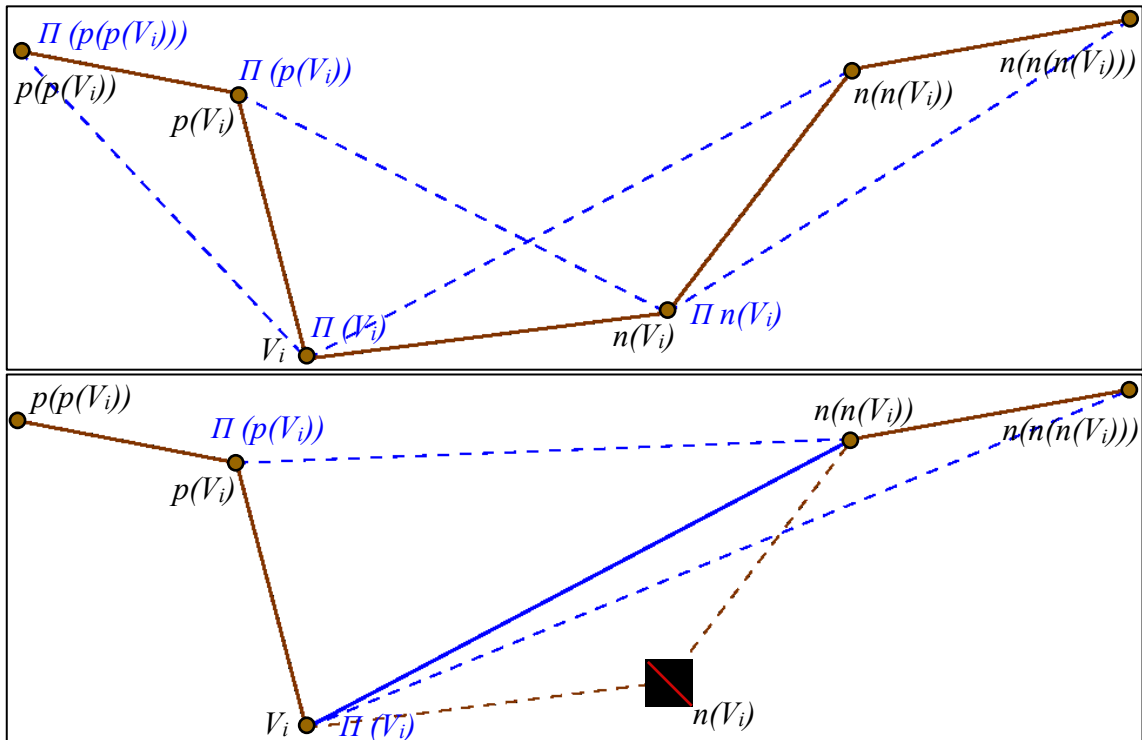
### Generalizační algoritmus založený na výpočtu potenciálu

Výpočet generalizačního potenciálu bodu je základem navrženého generalizačního algoritmu. Jak již bylo uvedeno výše, jedná se o metodu, která provádí zjednodušení linie metodou zdola nahoru, postupně odstraňuje vrcholy s vhodným generalizačním potenciálem. Základní myšlenka je založena na tom, že ze všech existujících trojic vrcholu  $\{V_i, n(V_i), n(n(V_i))\}$  je odstraněn vrchol  $n(V_i)$  takový, který má největší generalizační potenciál. Odstraněním vrcholu  $n(V_i)$  nahrazujeme trojici vrcholů  $\{V_i, n(V_i), n(n(V_i))\}$  dvojicí tvořenou přímou spojnici  $\{V_i, n(n(V_i))\}$ . Odstraněním vrcholu  $n(V_i)$  se změní potenciály  $\Pi$  u bodu  $p(V_i)$ ,  $V_i$ , které je nutno přepočítat, a pro  $n(V_i)$  je nastavena hodnota potenciálu -1. Budeme tedy upravovat potenciály  $\Pi(p(V_i))$  a  $\Pi(V_i)$  u těchto trojic bodů:

$$\{p(V_i), V_i, n(n(V_i))\},$$

$$\{V_i, n(n(V_i)), n(n(n(V_i)))\}.$$

Přepočítání potenciálu je znázorněno na Obr. 4.11.



Obr. 4.11: Přepočítání potenciálu.

Jednotlivé trojice jsou uchovány seřazené sestupně dle hodnot potenciálu  $n(V_i)$ . Pro tento účel lze použít např. prioritní frontu, doplněnou polem předchůdců a následníků. Alternativně, v první iteraci je možné množinu potenciálu seřadit, a po aktualizaci potenciálu pro sousední upravované trojice v každém kroku hledat maximum této množiny. Strategie založená na výběru prvku s maximálním potenciálem se snaží v prvních iteracích nahrazovat nevhodné prvky přímou spojnici a zamezit tak vzniku ostrých lomů.

Navrženou metodu lze sumarizovat do následujících bodů.

1. Ověření uzavřenosti vrstevnice jako u metody modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu.
2. Seskupení bodů vrstevnice  $v$  do trojic  $t$  po sobě následujících bodů  $\{V_i, n(V_i), n(n(V_i))\}$ .
3. Výpočet potenciálu  $\Pi(n(V_i))$  zvolenou metodou pro každou takovou trojici vzhledem k horní a dolní části bufferu.
4. Z trojice  $\{V_i, n(V_i), n(n(V_i))\}$  s největším potenciálem je eliminován prostřední vrchol  $n(V_i)$ , který nebude tvořit generalizovanou vrstevnici.

5. Přepočítání potenciálu u sousedních trojic  $\{p(V_i), V_i, n(n(V_i))\}$  a  $\{V_i, n(n(V_i)), n(n(n(V_i)))\}$  které byly ovlivněny eliminací vrcholu  $n(V_i)$  v předchozím kroku.
6. Opakování kroku 4. a 5. dokud existují vhodné trojice ke generalizaci. Ukončovací podmínkou je zpravidla dosažení hladkosti vrstevnice, která je měřena pomocí  $|\pi - \alpha| < \alpha_{\max}$ . Ve vrstevnici se tím pádem nebudou vyskytovat segmenty, které by se protnuly pod menším úhlem. Hodnotu  $\alpha_{\max}$  volíme v intervalu  $150^\circ - 170^\circ$ , viz kapitola 3.3.

Z bodů, které nebyly eliminovány, je vytvořena generalizovaná vrstevnice  $v'$ . Rekonstrukce proběhne v cyklu, kdy pro každý vrchol  $V_i$  hledáme jeho nástupce  $n(V_i)$ , dokud nedospějeme do koncového bodu.

### 4.2.7 Postprocessing vrstevnic

Po dokončení generalizace je nutné provést postprocessing spočívající v odstranění nevhodných segmentů v generalizované vrstevnici. Jedná se zejména o krátké úseky ve vrstevnici, které sousedí s dlouhým úsekem, takové části vrstevnice mají nevhodný průběh, který aplikováním vyhlazovacího algoritmu nelze vylepšit. Pro každou trojici vrcholů je zjištěn poměr délek sousedních segmentů

$$r_i = \min \left( \frac{\|V'_{i-1}, V'_i\|}{\|V'_i, V'_{i+1}\|}, \frac{\|V'_i, V'_{i+1}\|}{\|V'_{i-1}, V'_i\|} \right), \quad (4.11)$$

který slouží k rozhodnutí, zda má být krátký segment odstraněn. Jako kritická hodnota  $r_i$  se nejčastěji volí 0.15 nebo 0.3. Vždy musí být dodržen požadavek na maximální výškovou chybu odstraňovaného segmentu, tj. nově vzniklý segment by neměl protínat výškový buffer.

U generalizovaných vrstevnic jsou následně opět eliminovány vrstevnice, které nesplňují požadavek na minimální délku vrstevnice nebo minimální plochu uzavřené vrstevnice. Příslušné prahové hodnoty jsou stejné jako v kapitole 4.2.3.1.

## 4.3 Vyhlazení vrstevnic

Pro zlepšení estetického zpracování vrstevnic je nutné aplikovat vyhlazovací algoritmus. Existuje mnoho přístupů, které lze v praxi použít. Namátkou uvedeme např. opakované průměrování, aproximaci či interpolaci vhodnou křivkou, nejčastěji kubikou. Pro potřeby diplomové práce byla použita metoda aproximace výsledné polylinie kubikou založená



na modifikaci Chaikinsova algoritmu, často také označovaného jako algoritmus corner-cutting. Principem tohoto algoritmu je z množiny vrcholů

$$\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$$

vygenerovat novou podmnožinu bodů

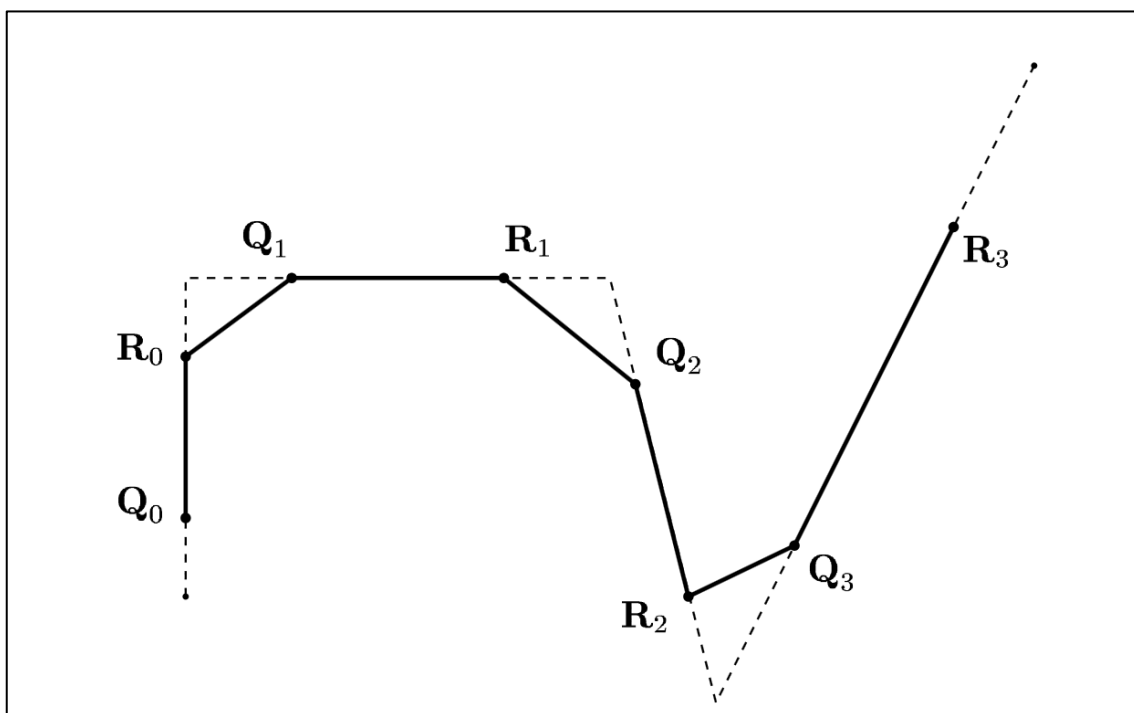
$$\{Q_0, R_0, Q_1, R_1, \dots, Q_{n-1}, R_{n-1}\},$$

kde nové páry bodů  $Q_i, R_i$  jsou vypočítány z úsečky  $P_i P_{i+1}$  následovně

$$Q_i = \frac{1}{k} P_i + \frac{k-1}{k} P_{i+1}, \quad (4.12)$$

$$R_i = \frac{k-1}{k} P_i + \frac{1}{k} P_{i+1}. \quad (4.13)$$

V praxi se nejčastěji volí parametr  $k=4$ , tj. nové body leží ve čtvrtině a třech čtvrtinách původního segmentu. Princip fungování algoritmu je zobrazen na obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Princip Chaikinsova algoritmu, zdroj: Joy (1999)

Při použití klasického vyhlazovacího algoritmu může dojít k tomu, že segment vyhlazené vrstevnice bude protínat výškový buffer a nebude tak dodržen požadavek na maximální výškovou chybu generalizace. Z toho důvodu je nový segmentu  $(R_i, Q_{i+1})$  vytvořen pouze tehdy pokud neprotíná výškový buffer. Modifikací se snížila míra vyhlazení v některých úsecích vrstevnice, ale byla dodržena požadovaná výšková chyba.

## 4.4 Hodnocení generalizace

Pro hodnocení výsledků generalizace budou použita kritéria definovaná v kapitole 3.5. Jedná se délky segmentů, poměr délek segmentů, velikost úhlů mezi jednotlivými segmenty, polohový a výškový posun.

Dále bude výsledek generalizace porovnán s již existujícími vrstevnicemi vytvořenými kartografem-profesionálem. Jedná se o vrstevnice připravovaného mapového díla ZTM5, které byly zapůjčeny s laskavým svolením Zeměměřického úřadu. V neposlední řadě bude hodnoceno, zda je výsledek z estetického pohledu uspokojivý. Estetické vnímání je však subjektivní a proto se hodnocení může u různých čtenářů lišit.

Přehled výsledků hodnocení najdeme v kapitole 6.

## 5 Implementace navržených metod

Tato kapitola se zabývá implementací navržených generalizačních algoritmů, a to metodou modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu (viz kap. 4.2.5) a metodou generalizačního potenciálu (viz kap. 4.2.6). Algoritmy byly implementovány v programovacím jazyce Python 2.7 za použití knihovny Arcpy. V kapitole 5.2 je podrobně popsán proces vytvoření a předzpracování referenčních vrstevnic. Implementaci modifikovaného DP algoritmu nalezneme v kap. 5.3, metodu generalizačního potenciálu v kap. 5.4.

### 5.1 Knihovna Arcpy

Knihovna Arcpy poskytuje API v programovacím jazyce Pythonu pro práci s prostorovými daty v softwaru ArcMap. Díky této knihovně lze snadno aplikovat funkce, které nabízí desktopová verze ArcMap. Použití knihovny umožnilo zkrátit vývoj generalizačních nástrojů, preprocessingových kroků, zpracování velkého množství dat a kartografickou prezentaci mapových výsledků s využitím softwaru ArcMap.

Knihovna Arcpy pracuje s geometrickými objekty *Point*, *Polyline* a *Polygon*, nemusíme tedy pro ně vytvářet vlastní třídy.

**Point**, instance této třídy, 3D bod, je definován souřadnicemi *X*, *Y*, a *Z*.

**Polyline**, instance této třídy, lomená čára, je tvořena seznamem objektů třídy *Point*.

**Polygon**, instance této třídy, uzavřená oblast, je tvořena seznamem objektů třídy *Point*.

Aby mohla být vytvořena korektní geometrie, první a poslední bod musí být totožný.

Příslušné třídy obsahují řadu nástrojů pro snadnou práci s objekty, a to prostřednictvím metod či vlastností; u objektu *polyline* se jedná například o `firstPoint`, `lastPoint`, `length`, `pointCount` nebo `spatialReference`.

Metody těchto tříd jsou volány pro konkrétní instanci s různými vstupními parametry. Uvedme stručný přehled nejvýznamnějších metod použitých v práci. Důležitou roli hrají geometrické metody měřící délky objektů či jejich vzdálenosti k jiným objektům, např. `distanceTo()`, `getLength()`, `queryPointAndDistance()` nebo `pointFromAngleAndDistance()`. Metody `contains()` nebo `crosses()` slouží k ověření prostorového vztahu dvou a více objektů, návratová hodnota je typu `bool`. V neposlední je k dispozici několik

geoprocessingových metod, realizujících množinové operace, např. metody `clip()`, `difference()` nebo `union()`.

Pro správnou funkcionální implementaci metod je nutné vlastnit licenci pro ArcMap extension 3D, která umožňuje vytvářet digitální modely terénu v podobě TIN a následně interpolovat vrstevnice. Kontrola dostupnosti extenze je provedena pomocí funkce `arcpy.CheckOutExtension("3D")`.

## HW a SW parametry

Veškeré práce byly realizovány ve vývojovém prostředí PyCharm 2017.3.4 (Community Edition) zpracování a testování probíhaly na dvou PC. Parametry jednotlivých počítačů jsou zobrazeny v tabulce 5.1. Využití školního PC významně zkrátilo výpočetní čas jednotlivých operací.

	Domácí PC	Školní PC
<b>Procesor</b>	Intel® Core™ i5-3230M CPU @ 2.60GHz	Intel® Core™ i9-9980XE CPU @ 3.00GHz
<b>RAM</b>	8 GB	128 GB
<b>OS</b>	Windows 8.1 Pro	Windows 10 Enterprise
<b>Arcmap</b>	10.5.1	10.7.1

*Tab. 5.1: Parametry PC*

## Ukázky zdrojového kódu

V práci bude implementace jednotlivých kroků prezentována krátkými ukázkami zdrojového kódu doplněného komentáři; tato varianta je přehlednější a dostačující pro pochopení dané operace. Implementace samotných generalizačních metod bude popsána pseudokódem, není tedy vyžadována znalost syntaxe programovacího jazyka Python. Kompletní zdrojové kódy generalizačních algoritmů jsou k dispozici na přiloženém Flash USB.

## 5.2 Předzpracování dat

Před samotnou generalizací je nutné provést vytvoření výchozích vrstevnic a příslušných výškových bufferů. Předzpracování dat je tvořeno několika fázemi závislými na API knihovny Arcpy. Tento proces je s menšími rozdíly totožný pro všechny generalizační metody, zahrnuje tyto kroky:

### Vytvoření bodového mračna

Ze souřadnic musí být vytvořena vrstva bodového mračna, která může být dále zpracována GIS funkcemi. Vrstva je vytvořena funkcí `arcpy.MakeXYEventLayer_management()`, pomocí funkce `arcpy.SpatialReference()` je nastaveno správné kartografické zobrazení, souřadnicový systém je nastaven EPSG: 5514 (S-JTSK) pro polohu a EPSG: 5705 (BpV) pro výšku. Vstupní data tvoří souřadnice  $X, Y, Z$  a výstupem je bodová *feature class*. Pro další zpracování je vrstva uložena funkcí `SaveToLayerFile`.

### Vytvoření TIN

Digitální model terénu ve formě TIN je vytvořen z bodového mračna funkcí `arcpy.CreateTin_3d()`. Metoda využívá 2D Delaunay triangulaci. Na vstupu funkce je bodová *feature class* s body datového typu `arcpy.Point` bodového mračna a výstupem je polyedrický digitální model terénu datového typu *TIN*.

### Vytvoření vstupních vrstevnic

Lineární interpolací jsou vytvořeny vstupní vrstevnice s požadovaným intervalem, který je v této práci pro předpokládané měřítko 1 : 5 000 až 1 : 10 000 zvolen jako 1 m. Tvorba vrstevnic je uskutečněna funkcí `arcpy.SurfaceContour_3d()`. Na vstupu funkce je digitální model terénu uložený v datovém typu `arcpy.tin`, výstupem funkce je liniová *feature class* s vrstevnicemi datového typu `arcpy.Polyline`.

### Vytvoření výškového bufferu

Výškový buffer s hodnotou  $dz=0,25\text{ m}$  představující vrstevnice s nadmořskou výškou  $z\pm dz$  je opět vytvořen funkcí `arcpy.SurfaceContour_3d()`.

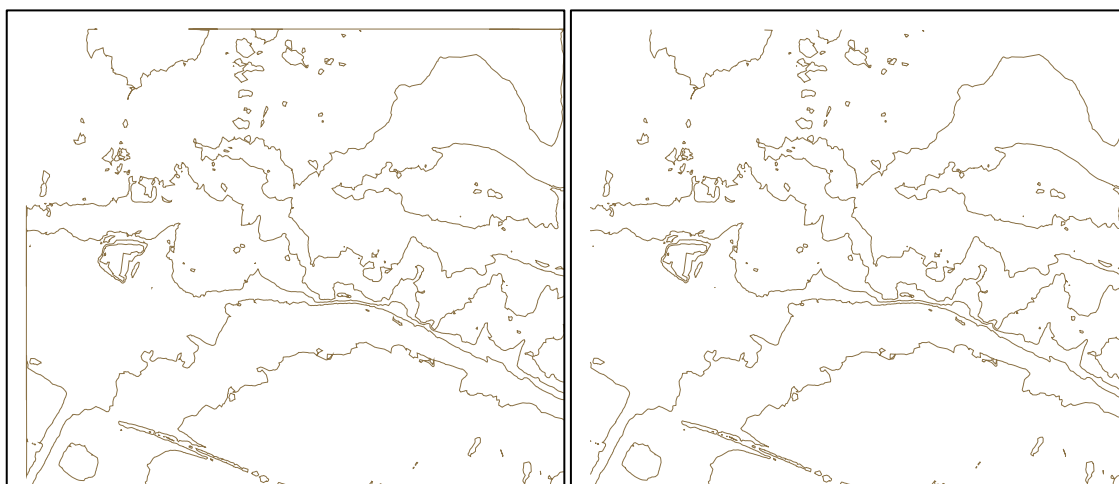
Výše uvedené body lze shrnout do následujících kroků a vyjádřit v programovacím jazyce Python.

```
arcpy.MakeXYEventLayer_management(input_table, x_coords, y_coords,
out_Layer, arcpy.SpatialReference(5514, 5705), z_coords)
saved_Layer = "out.lyr"
arcpy.SaveToLayerFile_management(out_Layer, saved_Layer)
triangle = arcpy.CreateTin_3d("TIN", arcpy.SpatialReference(5514,
5705), saved_Layer)
contours = arcpy.SurfaceContour_3d(triangle,
"/output/db.gdb/contours", 1)
contour_low = arcpy.SurfaceContour_3d(triangle,
"/output/db.gdb/contour_low", 1, -0.25)
contour_high = arcpy.SurfaceContour_3d(triangle,
"/output/db.gdb/contour_high", 1, 0.25)
```

### Ořezání okraje

Části vrstevnic, které jsou u okraje trojúhelníkové sítě, mají nevhodný průběh a je nutné provést jejich odstranění. V praxi se tento krok realizuje s využitím několika funkcí.

První použitou funkcí je `arcpy.MinimumBoundingGeometry_management()`, vstupním parametrem je *feature class* bodového mračka, výstupem pak *feature class* datového typu `arcpy.Polygon` s konvexní obálkou. Dále je aplikována funkce `arcpy.Buffer_analysis()`, která vytvoří o 1 m užší buffer typu `arcpy.Polygon` kolem vytvořené obálky. Funkce `arcpy.Clip_analysis()`, která je aplikovaná na vrstevnice i výškový buffer a odstraní nevhodné úseky, které jsou mimo vytvořený buffer. Porovnání vrstevnic před a po ořezání okrajových částí je zobrazeno na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Vrstevnice před (vlevo) a po (vpravo) ořezání okrajů.

Posloupnost těchto kroků lze s využitím knihovny Arcpy zapsat takto:

```
envelope_point_cloud =
arcpy.MinimumBoundingGeometry_management(saved_Layer,
"/output/db.gdb/envelope_point_cloud", "CONVEX_HULL")
envelope_buffer = arcpy.Buffer_analysis(envelope_point_cloud,
"/output/db.gdb/envelope_buffer", -1)
contours = arcpy.Clip_analysis(contours, envelope_buffer,
"/output/db.gdb/contours_clipped")
contour_low = arcpy.Clip_analysis(contour_low, envelope_buffer,
"/output/db.gdb/contour_low_clipped")
contour_high = arcpy.Clip_analysis(contour_high, envelope_buffer,
"/output/db.gdb/contours_high_clipped")
```

### Eliminace nevhodných vrstevnic

Lineární interpolací byly vygenerovány vstupní vrstevnice s nevhodnými kartografickými charakteristikami, viz pravidla v kap. 3.2. Následně je proto provedena eliminace vrstevnic, které nesplňují kartografické požadavky, jsou tedy kratší než 30 m, a uzavřených vrstevnic, které mají plochu menší než 500 m<sup>2</sup>, viz kap. 4.2.3.1. V prvním kroku je nutné převést multi-part geometrii vrstevnic a výškového bufferu na single-part za využití funkce `arcpy.MultipartToSinglepart_management()`. Na takto upravené vrstevnice je aplikována vlastní funkce `deletesmall()`. Na vstupu je *feature class* vrstevnic, která je upravena pomocí `arcpy.da.UpdateCursor()`. Kontrolu uzavřenosti vrstevnic porovnáním prvního a posledního bodu vrstevnice provádí vlastní funkce `check_closed()`.

Postup jednotlivých kroků s využitím knihovny Arcpy vypadá takto:

```
def deletesmall(contour, length_limit, area_limit):
    with arcpy.da.UpdateCursor(contour, ["OID@", "SHAPE@"]) as row:
        for line in row:
            if check_closed(line[1]):
                body = point_array(line[1])
                array = arcpy.Array([coords for coords in body])
                polygon = arcpy.Polygon(array)
                if polygon.area < area_limit or line[1].length <
length_limit:
                    row.deleteRow()
            else:
                if line[1].length < length_limit:
                    row.deleteRow()

def check_closed(contour):
    first_point_x = contour.firstPoint.X
    last_point_x = contour.lastPoint.X
    first_point_y = contour.firstPoint.Y
    last_point_y = contour.lastPoint.Y
    if (first_point_x == last_point_x) and (first_point_y ==
last_point_y):
        return True
    else:
        return False
```

## Rozdělení uzavřených vrstevnic

Navržené generalizační algoritmy předpokládají na vstupu vrstevnici reprezentovanou polylinií. Uzavřené vrstevnice se stejným počátečním a koncovým bodem musejí být rozděleny na více polylinií, k tomuto účelu jsou použity vrcholy min-max boxu představující jejich koncové body. Min-max box je vytvořen funkcí `arcpy.MinimumBoundingGeometry_management()`. Vrstevnice je tedy rozdělena na 2-4 otevřené segmenty. K rozdělení dojde ve vlastní funkci `SplitContour()`, na vstupu je uzavřená vrstevnice a na výstupu jsou rozdělené úseky vrstevnice.

Postup jednotlivých kroků ve funkci s využitím knihovny Arcpy je následující:

```
def LinesconvexHull(contour, contour_points):
    contour_one =
arcpy.CreateFeatureclass_management("/output/db.gdb", "closed_one",
"POLYLINE", "", "", "", 5514)
    with arcpy.da.InsertCursor(contour_one, ['SHAPE@']) as cursor:
        cursor.insertRow([contour])
    del cursor
```

Vytvoření min-max boxu a nalezení vrcholů vrstevnice ležících na hraně min-max boxu s využitím knihovny Arcpy. Funkce `swapLast()` přesune bod z první pozice na poslední pozici v poli. Tento krok je nutný pro správné vytvoření rozdělených segmentů.

```
bbox = arcpy.MinimumBoundingGeometry_management(contour_one,
"/output/db.gdb/bbox", "ENVELOPE")
bbox_line = arcpy.PolygonToLine_management(bbox,
"/output/db.gdb/bbox_line")
bbox_line_geom = arcpy.da.SearchCursor(bbox_line,
"SHAPE@").next()[0]
bbox_points = []
for cp in contour_points:
    if bbox_line_geom.contains(cp, "BOUNDARY"):
        bbox_points.append(cp)
bbox_points_swap = swapLast(bbox_points)
```

Vytvoření dvojic počátečního a koncového bodu rozděleného segmentu je provedeno pomocí funkce `zip()`. Následně jsou v cyklu vybrány všechny vrcholy uzavřené vrstevnice nacházející se mezi počátečním a koncovým bodem segmentu. Z těchto vybraných vrcholů je vytvořena nová polylinie. Postup těchto operací vypadá takto:

```
splited lines = []
body = zip(bbox_points, bbox_points_swap)
for two_points in body:
    if two_points[0].X == two_points[1].X and two_points[0].Y ==
two_points[1].Y:
        continue
```



```

i1 = contour_points.index(two_points[0])
i2 = contour_points.index(two_points[1])
array = arcpy.Array()
while i1 != i2:
    array.append(contour_points[i1])
    i1 = i1 + 1
    if i1 == len(contour_points):
        i1 = 0
array.append(contour_points[i2])
splited_lines.append(arcpy.Polyline(array))
return splited_lines

```

## 5.3 Modifikovaný Douglas-Peuckerův algoritmus

Tato kapitola se zabývá implementací modifikovaného Douglas-Peucker algoritmu. Z důvodu přehlednosti je použit pseudokód, varianta v programovacím jazyce Python je k dispozici na přiloženém Flash USB.

Metoda je implementována jako rekurzivní a využívá dvojice rekurzivních volání. Vstupní parametry jsou představovány listem bodů generalizovaného segmentu  $c$ , oběma komponentami výškového bufferu  $b1$  a  $b2$ , počátečním indexem  $is$ , koncovým indexem  $ie$  zpracovávaného segmentu, čtvrtým parametrem je pole vrcholů  $cs$ , ze kterých bude vytvořena finální generalizovaná vrstevnice.

Funkce je aplikována na generalizovaný segment vrstevnice ( $c[is]$ ,  $c[ie]$ ). Rekurse je ukončena, pokud daný segment tvoří méně než  $k$  bodů, nejčastěji se volí  $k=2$ , což odpovídá segmentu tvořeném pouze počátečním  $c[is]$  a koncovým  $c[ie]$  bodem. Následně je hledán nejvzdálenější bod generalizovaného úseku od spojnice ( $c[is]$ ,  $c[ie]$ ). Po nalezení takového bodu je testováno, zda spojnice ( $c[is]$ ,  $c[ie]$ ) protíná výškový buffer. V případě, že je tato podmínka splněna, je uložena hodnota maximální vzdálenosti  $dmax$  a index  $imax$  bodu s touto vzdáleností. Pokud byl nalezen nejvzdálenější bod a byla zároveň splněna podmínka protnutí výškového bufferu, pak je segment rozdělen na dva nové, ( $c[is]$ ,  $c[imax]$ ) a ( $c[imax]$ ,  $c[ie]$ ). Nad prvním segmentem je provedeno rekurzivní volání funkce, následně je přidán vrchol  $c[imax]$  do generalizované polylinie a jako poslední krok je rekurzivně volána funkce i pro druhý segment.

Pseudokód rekurzivní procedury vypadá takto:

```
simplify_DPR(c, cs, is, ie, b1, b2)
    if ie > is+1
         $\bar{d} = 0, \bar{i} = -1$ 
        for i = is+1:ie
            d = dist(c[i], c[is], c[ie])
            if d <  $\bar{d}$  and (c[is], c[ie]) intersects b1, b2
                 $\bar{d} = d, \bar{i} = i$ 
        if  $\bar{i} > 0$ 
            simplify_DPR(c, cs, is,  $\bar{i}$ , b1, b2)
            cs.add(c[ $\bar{i}$ ])
            simplify_DPR(c, cs,  $\bar{i}$ , ie, b1, b2)
```

Výše popsaná funkce je volána z nerekurzivní metody pro celou generalizovanou vrstevnici. Vlastní generalizace proběhne, pokud mají vrstevnice i oba výškové buffery vhodné vlastnosti, např. počet lomových bodů je menší než parametr  $k$ . V práci není kontrola minimálního počtu lomových bodů aplikována. Filtrace dat probíhá ve fázi předzpracování pomocí eliminace vrstevnic nesplňujících kritérium minimální délky (viz kap. 5.2).

```
simplify_DP(contour, b1, b2, k)
    if ||contour|| > k and ||b1|| > k and ||b2|| > k
        n = ||contour||
        contour_simp.add(contour[0])
        simplify_DPR(contour, contour_simp, 0, n, b1, b2)
        contour_simp.add(contour[n])
```

Tato implementace má horní odhad asymptotické složitosti  $O(n^2)$ , lze ji použít i pro relativně rozsáhlá data. Metoda dále využívá výpočet průsečíku generalizovaného segmentu a výškového bufferu.

### 5.3.1 Výpočet průsečíku generalizovaného segmentu a výškového bufferu

Jedná se o úlohu opakovaného hledání průsečíku dvojice liniových segmentů. Obecně má úloha hledání vzájemných průsečíků  $n$  linií složitost  $O(n^2)$ , v příznivých případech lze složitost snížit na  $\Theta(n \log n)$ , a to za použití metod na bázi prioritní fronty (Bentley a Ottman, 1979). Pro účely diplomové práce nebyla použita žádná ze sofistikovaných metod a byla testována existence průsečíku generalizovaného segmentu vůči všem segmentům výškového bufferu.

Výpočet existence průsečíku úsečky  $u_1$  tvořené body  $P_1[x_1, y_1]$  a  $P_2[x_2, y_2]$  s úsečkou  $u_2$  tvořené body  $P_3[x_3, y_3]$  a  $P_4[x_4, y_4]$  je tvořen několika kroky. Nejprve určíme směrové vektory  $u, v, w$

$$u = (x_2 - x_1, y_2 - y_1), \quad v = (x_4 - x_3, y_4 - y_3), \quad w = (x_1 - x_3, y_1 - y_3).$$

Následně určíme koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$

$$\alpha = \frac{k_1}{k_3}, \beta = \frac{k_2}{k_3},$$

kde

$$k_1 = v_x w_y - v_y w_x, \quad k_2 = u_x w_y - u_y w_x, \quad k_3 = v_y u_x - v_x u_y.$$

Pokud  $k_1=0, k_2=0$  i  $k_3=0$  jsou úsečky kolineární. V případě že  $k_1=0, k_2=0$  a  $k_3$  je nenulové, tak jsou obě úsečky rovnoběžné. Pokud  $\alpha \in \langle 0,1 \rangle$  a  $\beta \in \langle 0,1 \rangle$ , pak průsečík úseček  $u_1$  a  $u_2$  existuje.

V práci byla nejdříve implementována funkce `crosses()`, kterou nabízí knihovna Arcpy pro objekty třídy *Polyline*. Na vstupu funkce je porovnávána geometrie druhého objektu, v našem případě výškového bufferu. Tato funkce v některých případech vracela chybné výsledky a byla výpočetně náročnější. Pro zvýšení výpočetní rychlosti algoritmu byla funkce `crosses()` nahrazena funkcí `distanceTo()`. Funkce `distanceTo()` vypočítá vzdálenost mezi dvěma objekty. V případě, že je výsledek rovný 0, lze prohlásit, že pro testované objekty existuje alespoň jeden průsečík.

## 5.4 Metoda generalizačního potenciálu

Tato kapitola se zabývá implementací nejperspektivnější navržené metody, a to metody generalizačního potenciálu, popsané v kapitole 4.2.6.

### Datová reprezentace vrstevnice

Navržená metoda výpočtu generalizačního potenciálu z generalizované vrstevnice nevhodné body nemaže, což je výpočetně náročná operace, ale přeskakuje je. K zachování správné posloupnosti bodů je použit systém předchůdců a následníků. Místo odstranění nevhodného bodu pouze změníme následníka jeho předchůdce a předchůdce jeho následníka.

Pro obousměrný pohyb po jednotlivých vrcholech generalizované polylinie je nutné uchovat seznam předchůdce a následníka každého uzlu (viz Tab. 5.2). Pro tento účel je vytvořena dvojice pomocných seznamů *prev*, *next* stejné délky jako vrstevnice.

Neexistujícího předchůdce prvního uzlu a následovníka posledního uzlu inicializujeme na -1.

<b>contour</b>	0	1	2	3	4	5	...	n-1
<b>prev</b>	-1	0	1	2	3	4	...	n-2
<b>next</b>	1	2	3	4	5	n-1	...	-1

Tab. 5.2: Indexy vrcholů vrstevnice, předchůdců a následníků

Inicializace pole předchůdců provedeme takto:

```
prev = []
prev.append(-1)
for i in range(len(contour_points) - 1):
    prev.append(i)
```

Inicializace následovníků je analogická:

```
next = []
for i in range(len(contour_points) - 1):
    next.append(i + 1)
next.append(-1)
```

Procházení vpřed bude používáno při sekvenčním procházení vrstevnice od počátečního ke koncovému bodu, zpětný pohyb je využit při výpočtu opravovaných potenciálů.

### Vytvoření aproximovaného bufferu

Metoda *knnsearch* ke každému bodu vrstevnice nalezne nejbližší bod z horní a dolní hrany výškového bufferu, dojde tak k vytvoření aproximovaného výškového bufferu (viz kap. 4.2.6).

```
[knn_id1, knn_d1] = knn.search(b1, c)
[knn_id2, knn_d2] = knn.search(b2, c)
```

Tato operace umožní snížení výškové a polohové členitosti skutečného bufferu, důsledkem čehož se vrstevnice nebudou tolik lámat.

### Oprava potenciálu sousedních vrcholů

Dalšími dvěma pomocnými proměnnými jsou hodnoty *i\_fist* a *i\_last*, které řídí, u jakých vrcholů bude generalizační potenciál přepočítáván. V první iteraci je nutné spočítat potenciál všech bodů, hodnoty jsou ukládány do seznamu *pots*. V dalších iteracích jsou opravovány potenciály sousedící s vynechaným vrcholem *i*, tj. bodu s indexem *prev[i]* a *next[next[i]]*. Dále je hodnotě *i\_first* přiřazen *prev[i]* a hodnotě *i\_last* je přiřazen *next[i]*. Přepočet potenciálu pouze u sousedních vrcholů výrazně snižuje výpočetní

náročnost algoritmu, oproti přístupu, kdy je po každém vynechání bodu přepočítáván potenciál pro každý vrchol.

### Vlastní generalizační algoritmus

Generalizovaná vrstevnice  $c$  je procházena sekvenčně s využitím pomocného pole  $next$  dokud  $next[i] \neq -1$ . Při hledání maxima je používána dvojice pomocných proměnných  $i1$  a  $i3$ , které představují index prvního a posledního bodu trojice. Pracujeme tedy s trojicí bodů  $(i1, next[i1], i3)$ , kde  $i3 = next[next[i3]]$ . Potenciál  $\Pi(next[i1])$  trojice je uložen k bodu s indexem  $i1$ .

V prvním kroku je nalezen bod s největším generalizačním potenciálem  $\bar{\Pi}$ , index příslušného vrcholu označíme  $\bar{i}$ ; jedná se o klasickou úlohu hledání maxima. Generalizace tedy probíhá od bodu s největším generalizačním potenciálem  $\bar{\Pi}$ . Pokud je potenciál  $\bar{\Pi}$  větší než zvolená prahová hodnota a nedochází k protnutí spojnice bodu vrstevnice  $(c[i], c[next[next(i)]])$  s výškovým bufferem, je prostřední bod trojice s indexem  $next[i]$  přeskočen

```
prev[next[next[ $\bar{i}$ ]]] =  $\bar{i}$ 
next[ $\bar{i}$ ] = next[next[ $\bar{i}$ ]]
```

a následně je upravena hodnota indexů  $i\_first$  a  $i\_last$

```
i_first = (prev[ $\bar{i}$ ]  $\neq$  -1 ? prev[ $\bar{i}$ ]:  $\bar{i}$ )
i_last = (next[ $\bar{i}$ ]  $\neq$  -1 ? next[ $\bar{i}$ ]:  $\bar{i}$ )
```

představující indexy bodů s přepočítaným generalizačním potenciálem. Při úpravě následníků a předchůdců je nutné ošetřit situace, kdy předchůdce nebo následovník daného bodu neexistují.

Kompletní pseudokód generalizační funkce vypadá takto:

```
simplifyPotencial(contours, buffers1, buffers2, z, dz, k)
    for c:contours
        b1 = buffers1[z-dz]
        b2 = buffers2[z+dz]
    if ||c||>k and ||b1||>k and ||b2||>k
        [knn_id1, knn_d1] = knn.search(b1, c)
        [knn_id2, knn_d2] = knn.search(b2, c)
        prev.init(), next.init()
        i_first = 0, i_last = ||c||
        while(true)
            i1 = 0,  $\bar{i}$  = -1,  $\bar{\Pi}$  = -1
```

```

        while next[next[i]] ≠ -1
            i3 = next[next[i1]]
            if i1 > i_first and i1 ≤ i_last
                pots[i] = Π(i1, next[i1], i3, knn_id1,
knn_id2)

                if pots[i] >  $\overline{\Pi}$ 
                     $\overline{i}$  = i1,  $\overline{\Pi}$  = pots[i]
                    i1 = next[i1]
            if  $\overline{i}$  = -1
                break
            prev[next[next[ $\overline{i}$ ]]] =  $\overline{i}$ 
            next[ $\overline{i}$ ] = next[next[ $\overline{i}$ ]]
            i_first = (prev[ $\overline{i}$ ] ≠ -1 ? prev[ $\overline{i}$ ]:  $\overline{i}$ )
            i_last = (next[ $\overline{i}$ ] ≠ -1 ? next[ $\overline{i}$ ]:  $\overline{i}$ )

```

Metodu by bylo možné implementovat také s použitím zásobníku.

## 5.5 Postprocessing dat

Na generalizované vrstevnice jsou aplikovány ještě postprocessingové metody pro zlepšení jejich kartografických vlastností (viz Kap. 3.2P2). První metoda odstraní nevhodné segmenty, v našem případě se jedná o krátké segmenty sousedící s dlouhými segmenty. Rozhodovací pravidlo je aplikováno na vzájemný poměr  $r$  (4.11) délek segmentů  $d1$  a  $d2$ . Eliminace nevyhovujícího segmentu je aplikována pouze v případě, kdy nedochází k překročení maximální výškové chyby, tj. protnutí výškového bufferu. Na vstupu funkce je seznam vrcholů generalizované vrstevnice, minimální povolený poměr délek a výškový buffer. Výstupem je upravený seznam vrcholů, ze kterého je vytvořena generalizovaná vrstevnice.

Funkce s využitím knihovny Arcpy vypadá takto

```

Def remove_small_segment(vertices, min_ratio, c_low_high):
    new_vertices = arcpy.Array()
    new_vertices.append(vertices[0])
    new_vertices.append(vertices[1])
    for i in vertices[2:]:
        if same_point(new_vertices[-1], i):
            continue
        d1 = point_distance(new_vertices[-2], new_vertices[-1])
        d2 = point_distance(new_vertices[-1], i)
        ratio = min(d1/d2, d2/d1)

```

```

    if ratio < min_ratio:
        line = arcpy.Polyline(arcpy.Array([new_vertices[-2], i]))
        line = line.projectAs(arcpy.SpatialReference(5514, 5705))
        if not line.distanceTo(c_low_high) < 0.0001:
            new_vertices.replace(len(new_vertices)-1, i)
        else:
            new_vertices.append(i)
    else:
        new_vertices.append(i)
return new_vertices

```

V druhém kroku postprocessingu je provedena eliminace vrstevnic, které nesplňují kartografické požadavky. Parametry jsou totožné jako v kapitole 5.2. Eliminovány jsou tedy vrstevnice kratší než 30 m a uzavřené vrstevnice, které mají plochu menší než 500 m<sup>2</sup>.

### 5.5.1 Vyhlazení vrstevnic

Na závěr jsou generalizované vrstevnice vyhlazeny, tak aby byly esteticky vhodnější (viz kap. 3.3). Jak bylo uvedeno v kapitole 4.3 je v práci použit Chaikinskův algoritmus. Ze dvou úseček se společným vrcholem je odstraněna jejich  $k$ -tina, standardně  $k=1/4$ . Dva segmenty jsou tedy nahrazeny trojicí segmentů, nový segment začíná v  $(k-1)/k$ -tině první úsečky, končí v  $1/k$  druhé úsečky. Algoritmus je implementován s využitím knihovny Numpy. Souřadnice vrcholů vrstevnice jsou vloženy do seznamů  $L$  a  $R$ , kde  $L$  reprezentuje nové body na levé straně segmentu a  $R$  nové body na pravé straně segmentu, které jsou následně násobeny podle požadovaného poměru  $k=4$ , resp. míry ořezání rohů. Sečtením pole  $L$  a  $R$  vznikne vyhlazená vrstevnice.

Vytvoření Numpy pole souřadnic vrstevnice vypadá následovně:

```

with arcpy.da.SearchCursor(to_points, "SHAPE@XY") as point_cursor:
    coords = []
    for i in point_cursor:
        coords.append(i[0])
coords = np.array(coords)

```

Následně je ve *for* cyklu provedeno samotné vyhlazení, počet iterací cyklů je nastavitelný uživatelem:

```
for _ in range(refinements):
    L = coords.repeat(2, axis=0)
    R = np.empty_like(L)
    R[0] = L[0]
    R[2::2] = L[1:-1:2]
    R[1:-1:2] = L[2::2]
    R[-1] = L[-1]
    coords = L * 0.75 + R * 0.25
```

Takto implementovaný algoritmus je výpočetně nenáročný, ale může nastat situace, že vyhlazená vrstevnice nedodrží maximální výškovou chybu. Pro dodržení tohoto požadavku je nutné k metodě přidat kontrolu protnutí výškového bufferu. Vyhlazený segment je považován za korektní, pokud neprotíná výškový buffer. Opět místo testování průsečíku, měříme vzdálenost segmentu a výškového bufferu (viz kap. 5.3.1).

Úprava Chainkinsova algoritmu doplněného testem protnutí výškového bufferu s využitím knihovny Arcpy vypadá takto:

```
for _ in range(refinements):
    L = coords.repeat(2, axis=0)
    R = np.empty_like(L)
    R[0] = L[0]
    R[2::2] = L[1:-1:2]
    R[1:-1:2] = L[2::2]
    R[-1] = L[-1]
    coords = L * 0.75 + R * 0.25
    line = zip(coords, coords[1:])
    coords = []
    for i in line:
        if i[0][0] == i[1][0] and i[0][1] == i[1][1]:
            continue
        coords.append(i[0])
        p1 = arcpy.Point(i[0][0], i[0][1])
        p2 = arcpy.Point(i[1][0], i[1][1])
        one_line = arcpy.Polyline(arcpy.Array([p1, p2]))
        one_line = one_line.projectAs(arcpy.SpatialReference(5514,
5705))
        if one_line.distanceTo(c_lh) == 0.0:
            try:
                coords[-1] = 1.5 * i[0] - 0.5 * coords[-2]
            except IndexError:
                pass
        coords.append(line[-1][1])
    coords = np.array(coords)
```



## 6 Výsledky práce

Tato kapitola prezentuje výsledky kartografické generalizace vrstevnic nad vybranými testovacími územími. Do vlastního testování jsme se rozhodli zařadit pouze dvě metody, a to metodu modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu a metodu generalizačního potenciálu, důvody jsou diskutovány v kap. 6.1.

V kapitole 6.2 jsou diskutovány optimální hodnoty vstupních parametrů generalizačních algoritmů. Jedná se zejména o velikost výškového bufferu (viz kap. 3.4), vliv použití jeho aproximované varianty (viz kap. 4.2.6) a způsob výpočtu potenciálu (viz kap. 4.2.6). V kapitole 6.3 jsou popsána vstupní data, v kapitole 6.4 vzorová území (celkem 5), vlastní testování, výsledky testování a jejich zhodnocení nalezneme v kap. 6.5.

### 6.1 Testované generalizační algoritmy

Připomeňme, že v práci byly navrženy celkem tři metody pro kartografickou generalizaci vrstevnic. Dle předběžných výsledků diskutovaných v kap. 4.2 dvě z těchto metod, metoda modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu a metoda generalizačního potenciálu, poskytují perspektivní výsledky, budou tedy podrobeny detailnímu testování. Metoda váženého průměrování byla označena za nevhodnou, a to z důvodu následujících chyb:

- 1) U generalizovaných vrstevnic je možný častý vznik self-intersections, tuto chybu nelze triviálním způsobem odstranit.
- 2) Generalizovaná vrstevnice může ležet mimo výškový buffer. Tato chyba nastává při odstranění nevhodných spojnic výškového bufferu nebo při průměrování v komplikovaných oblastech, kde je průběh vrstevnice a výškového bufferu velmi odlišný. Chybu by bylo možné odstranit složitou implementací dodatečných testovacích podmínek existence průsečíků segmentu a výškového bufferu.

Z výše uvedených důvodů jsme se tuto metodu rozhodli nezařadit do dalšího testování.

### 6.2 Vstupní parametry algoritmu

Výhodou navržených algoritmů je možnost nastavit různé hodnoty vstupních parametrů a tím ovlivnit míru a styl generalizace. Tato vlastnost je současně i jejich možnou nevýhodou, protože je nutné vybrat metodu konstrukce bufferu, výpočtu potenciálu

a diskutovat jednotlivé parametry s cílem nalézt jejich optimální hodnoty. Potřeba upravovat hodnoty těchto parametrů vznikla během testování. Jejich nastavení, které je však z části ovlivněno subjektivním přístupem kartografa a jeho požadavkům na ideální míru generalizace, je ovlivněno faktory uvedenými v kapitole 4.1; jedná se zejména o účel mapy, měřítko mapy, charakteristiky vyjadřujícího prostoru a kartografické vyjadřující prostředky.

V této kapitole se podrobněji podíváme na níže uvedené vstupní parametry algoritmu:

1. Předzpracování vstupních vrstevnic.
2. Velikost výškového bufferu.
3. Volba typu výškového bufferu.
4. Metoda výpočtu potenciálu.
5. Maximální délka segmentu (viz kap. 3.2P2).
6. Odstranění sousedních segmentů s různou délkou (viz kap. 3.3G2).
7. Míra dodatečných úprav.

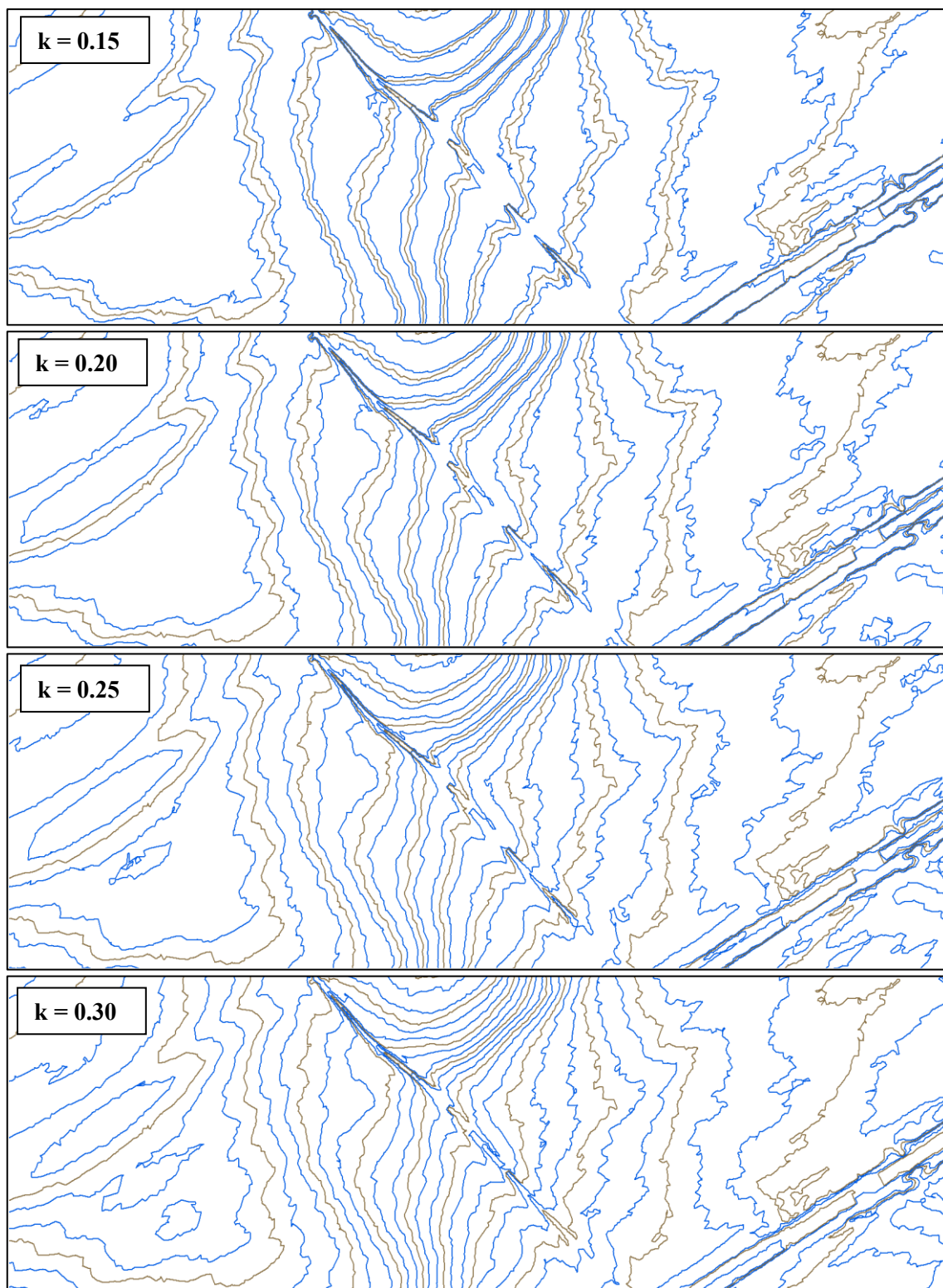
### **6.2.1 Předzpracování vstupních vrstevnic**

Míra předzpracování vstupních vrstevnic (viz kap. 4.2.3.1) se nastavuje na základě měřítkového čísla  $M$  výsledné mapy. Důležitou roli hraje minimální délka zobrazitelného elementu v mapě a minimální plocha zobrazitelného elementu. Hraniční hodnoty jsou zvoleny na základě měřítka výsledné mapy. V rámci předzpracování byla aplikována tato pravidla:

1. Pokud je délka vrstevnice menší než 30 m (3 mm v měřítku mapy), byla vrstevnice odstraněna ze vstupního souboru dat.
2. Pokud je plocha uzavřené vrstevnice menší než 500 m<sup>2</sup> (odpovídá zhruba čtverci se stranou 2.5 mm v měřítku mapy), vrstevnice je odstraněna ze vstupního souboru dat.

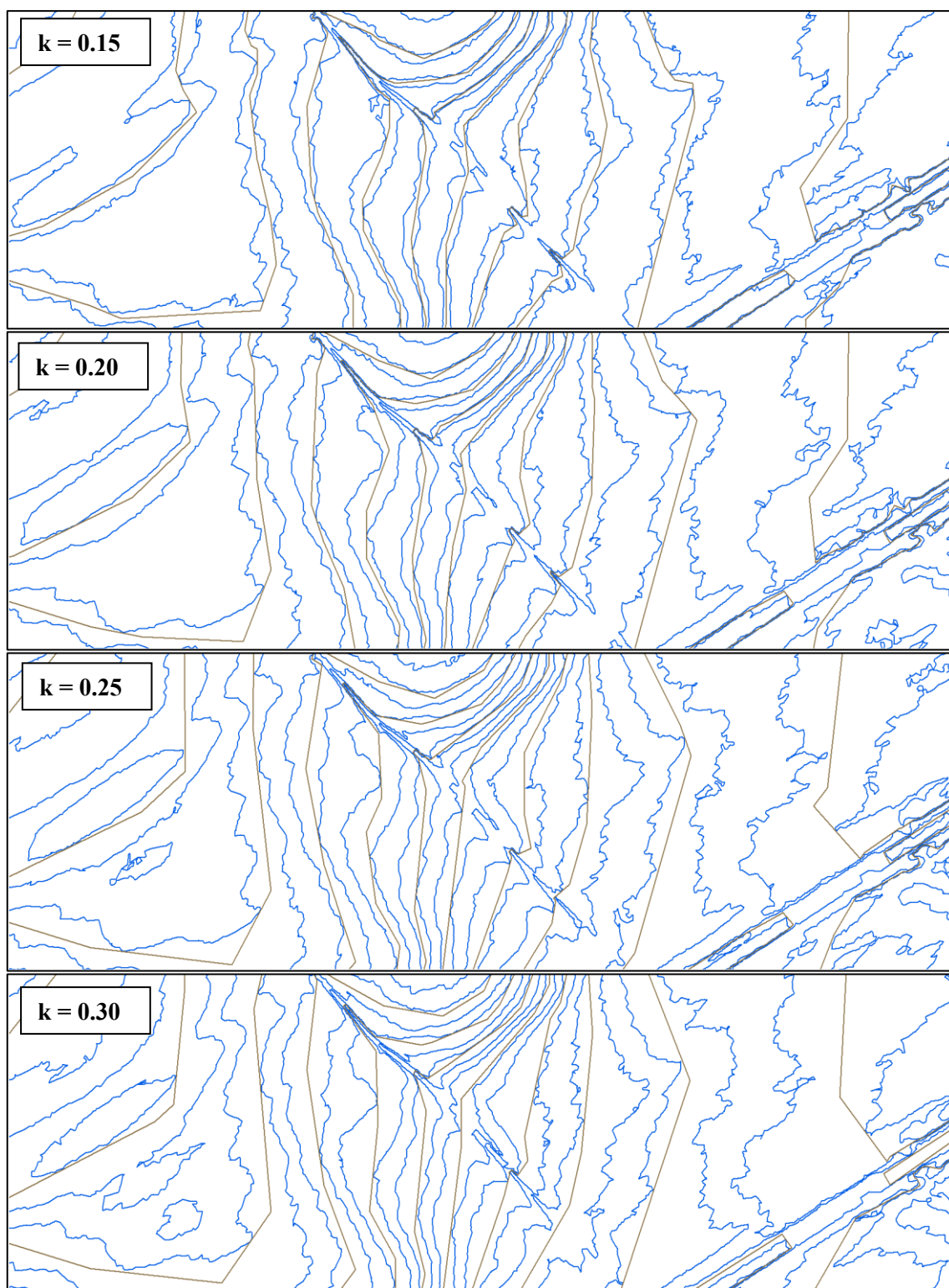
### **6.2.2 Velikost výškového bufferu**

Výškový buffer podrobně popsany v kap. 3.4, představuje klíčový parametr generalizačního algoritmu. Jeho „šířka“ (viz Obr. 6.1) ovlivňuje míru generalizace vstupních dat. Čím větší šířku vstupního bufferu zvolíme, tím větší bude míra generalizace, příliš široký buffer může naopak vést k přílišné generalizaci.



*Obr. 6.1: Výškové buffery s různou hodnotou  $k$ .*

V této kapitole budou diskutovány hodnoty koeficientu  $k = 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$  (viz Obr. 6.1), generalizované vrstevnice odpovídající těmto situacím jsou na Obr. 6.2.



Obr. 6.2: Vliv šířky bufferu na generalizaci.

Při porovnání se zaměříme na pravou stranu výřezu testovaného území. V této části je patrné, jaký vliv má hodnota  $k$  na šířku výškového bufferu a na tvar generalizovaných vrstevnic. Pro hodnoty  $0.15$  a  $0.20$  je výškový buffer „úzký“ a průběh vrstevnice je vzhledem k měřítku  $M$  stále příliš podrobný, došlo by k malé míře generalizace pro různé části vrstevnice. Naopak, při použití hodnoty  $0.30$  je výškový buffer příliš široký a při

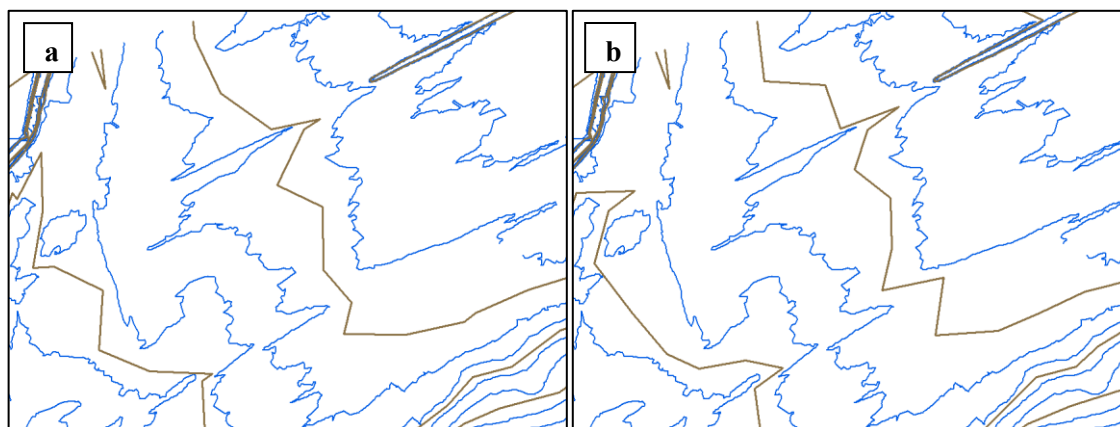
generalizaci by mohlo dojít ke ztrátě informace o charakteru území. Tento problém nastává hlavně v rovinatých územích s malými výškovými rozdíly s vysokou oscilací vrstevnic. Z požadavku pro dostatečnou míru generalizace a zachování charakteru území se jako optimální jeví hodnota  $k=0.25$ . Tato hodnota odstraňuje oscilace vrstevnic, ale zároveň však zachovává dostatečnou míru jejich podrobnosti. Pro jiné hodnoty měřítkového čísla mapy  $M$ , do které generalizujeme, bychom museli hodnotu  $k$  volit opět individuálně, neexistuje univerzální hodnota.

### 6.2.3 Volba typu výškového bufferu

V práci byly popsány dva přístupy volby výškového bufferu, a to jeho úplná nebo aproximovaná varianta. Podíváme se, která z nich je vhodnější pro vlastní kartografickou generalizaci.

V kap. 4.2.6 byl představen aproximovaný buffer, který z původního bufferu používá pouze body, které jsou nejbližší původním vrcholům vrstevnice. Tento parametr je použit pouze u metody potenciálu (viz kap. 4.2.6). Výhodou aproximovaného bufferu je snížení jeho tvarové členitosti, což ovlivní i výsledný tvar vrstevnice. Čím více bodů z původního výškového bufferu vstupuje do generalizačního algoritmu, tím více generalizovaná vrstevnice reflektuje umístění a tvar referenční vrstevnice ve výškovém bufferu a naopak. Aproximovaný buffer tedy generuje vrstevnice jednodušších tvarů.

Ukázka výsledku obou přístupů je zobrazena na obrázku 6.3. Při testování bylo zjištěno, že vhodnějšího vystižení tvaru vrstevnice dosáhneme výběrem všech bodů podél generalizovaného segmentu. Aproximovaný buffer potlačuje některé důležité tvarové rysy vrstevnic, provádí jejich přílišnou generalizaci.



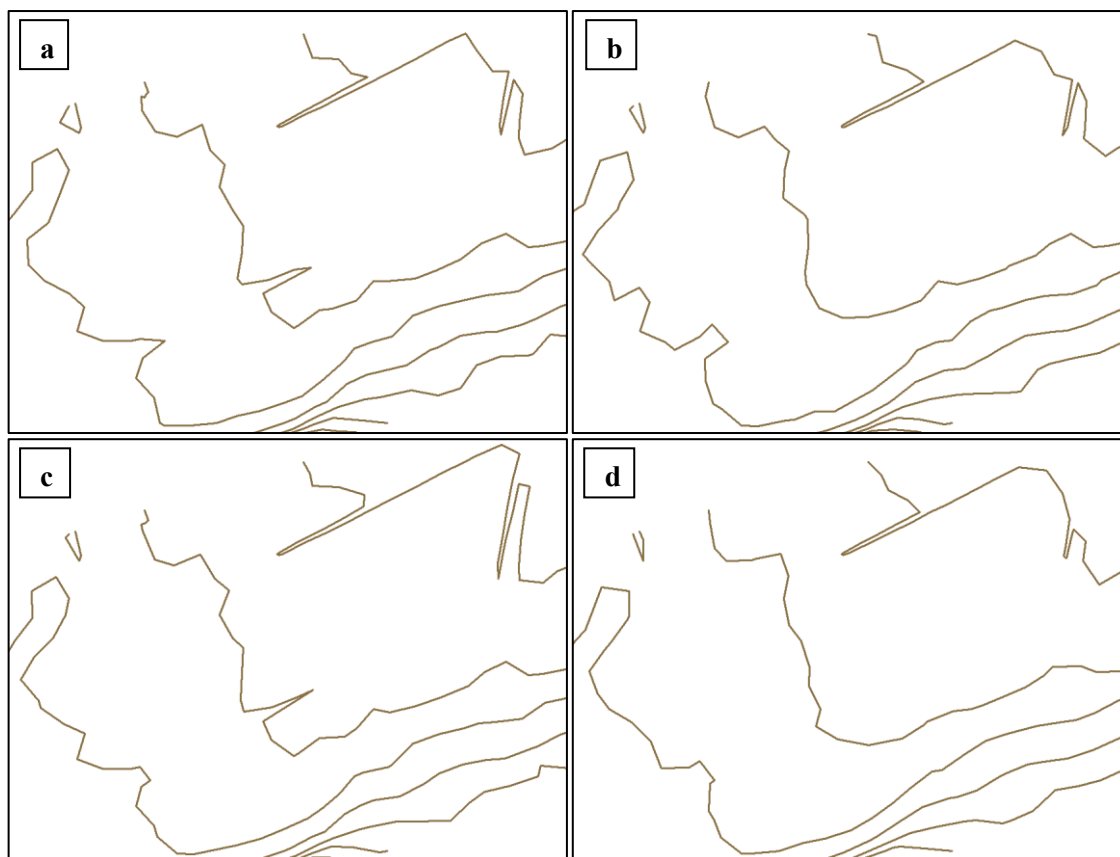
Obr. 6.3: Vliv typu výškového bufferu, a – aproximovaný buffer, nejbližší bod, b – úplný buffer, všechny body podél segmentu.

## 6.2.4 Metoda výpočtu potenciálů

Tento bod se týká pouze metody generalizačního potenciálu (viz kap. 4.2.6). Připomeňme, že generalizační potenciál  $II$  bodu můžeme počítat několika způsoby, min- (4.6), max- (4.5) nebo průměrovou metrikou (4.4).

První metoda určuje vzdálenost generalizovaného segmentu od výškového bufferu s cílem nalézt takový segment, který vede co nejvíce středem původního výškového bufferu. Tento přístup však může vést k nežádoucím oscilacím či lomům, což je patrné na obrázku 6.4a – c. Významně se tato negativní vlastnost projeví, pokud pro výpočet potenciálu použijeme minimální vzdálenost generalizovaného segmentu od výškového bufferu, viz Obr. 6.4a, méně se projeví u maximální či průměrné vzdálenosti, viz Obr. 6.4b a 6.4c. Vrstevnice se v těchto případech snaží zachovat tvar bufferu na úkor křivosti.

Druhá metoda využívá pro výpočet potenciálu úhly mezi segmenty s cílem odstranit v prvních iteracích segmenty, ve kterých se vrstevnice láme. Takto aproximovaný buffer hůře aproximuje tvar, lépe však zachovává křivost, viz Obr. 6.4d. Je patrné, že kartograficky vhodnější výsledky vznikají při použití úhlového potenciálu. Tato metoda byla následně použita při generalizaci vrstevnic.



Obr. 6.4: Vrstevnice generalizované v závislosti na výpočtu potenciálu, a – minimální, b – maximální, c – průměrná vzdálenost generalizovaného segmentu od bufferu, d – úhlový potenciál.

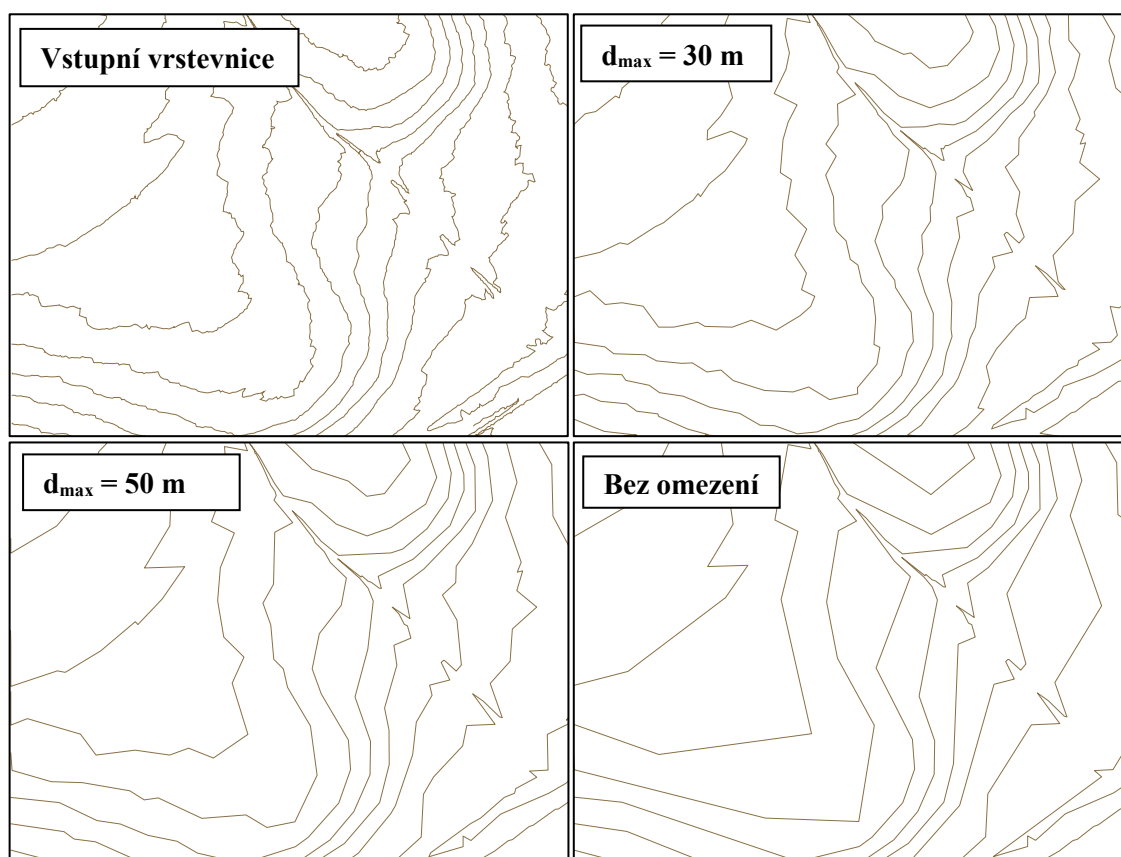


## 6.2.5 Maximální délka generalizovaného segmentu

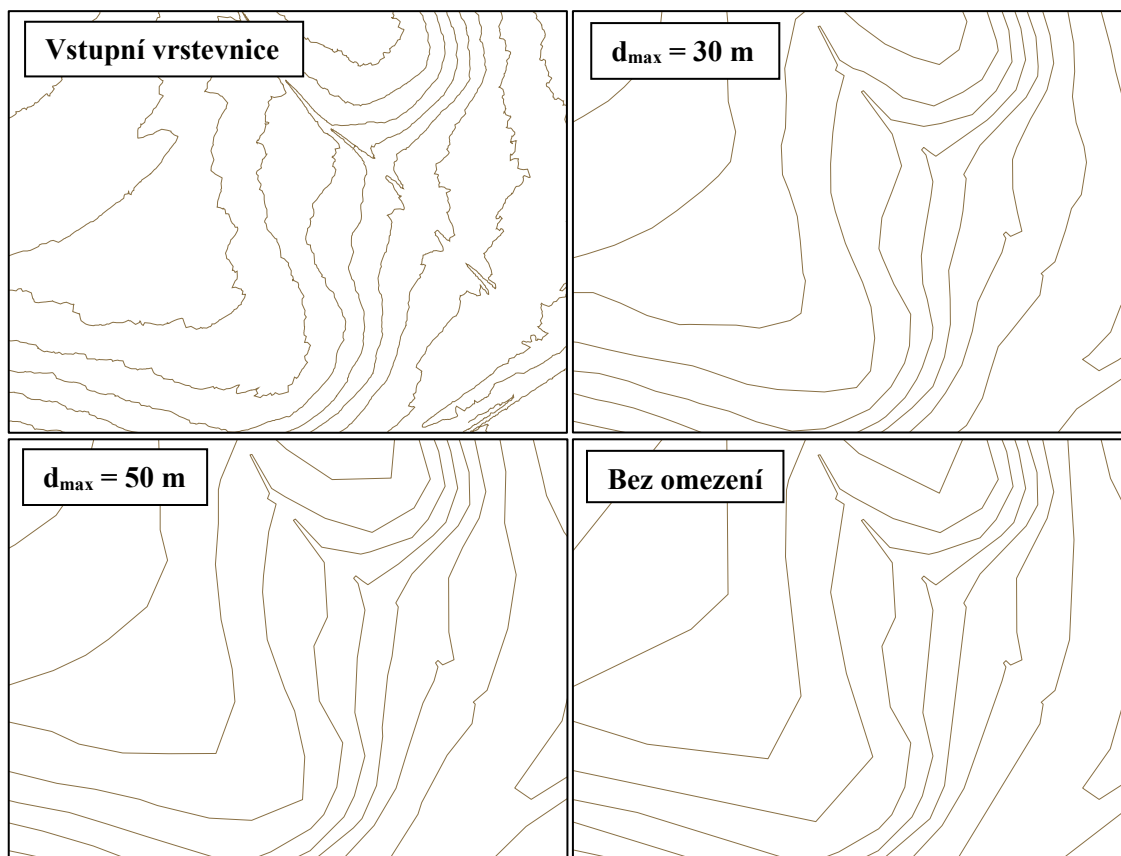
Parametr maximální délky segmentu by měl být nastaven v závislosti na měřítkovém čísle  $M$  cílové mapy, popř. specifickému požadavku na míru generalizace. Omezení maximální délky segmentu vychází z P2 uvedeném v kap. 3.2. Jako vhodná varianta se jeví volba  $d_{max}$  v závislosti na  $M$  v intervalu

$$d_{max} = \left\langle \frac{M}{200}, \frac{M}{100} \right\rangle.$$

Na základě testování bylo stanoveno, že pro cílové měřítko 1 : 10 000 je ideální maximální délka segmentu  $d_{max} = 50 \text{ m}$ , což odpovídá délce 5 mm v mapě. Ukázka různého nastavení délek segmentů je zobrazena na Obr. 6.5 a na Obr. 6.6. Z obrázků je patrné, že kratší délka segmentu  $d_{max} = 30 \text{ m}$  vedla ke vzniku oscilací a nepřirozeně zalomeným vrstevnicím. Průběh vrstevnic bez délkového omezení netvoří výrazné oscilace, ale vznikají pro vrstevnice nepřirozeně dlouhé segmenty. Vhodnou aplikací omezení maximální délky segmentu, lze docílit vytvoření generalizovaných vrstevnic vnímaných jako plynulejších, s menším počtem nevhodných oscilací. Tato vlastnost se týká jak modifikovaného Douglas-Peuckerova algoritmu, tak i metody generalizačního potenciálu.



Obr. 6.5: Vliv omezení délky segmentu u generalizace modifikovanou metodou Douglas-Peucker.

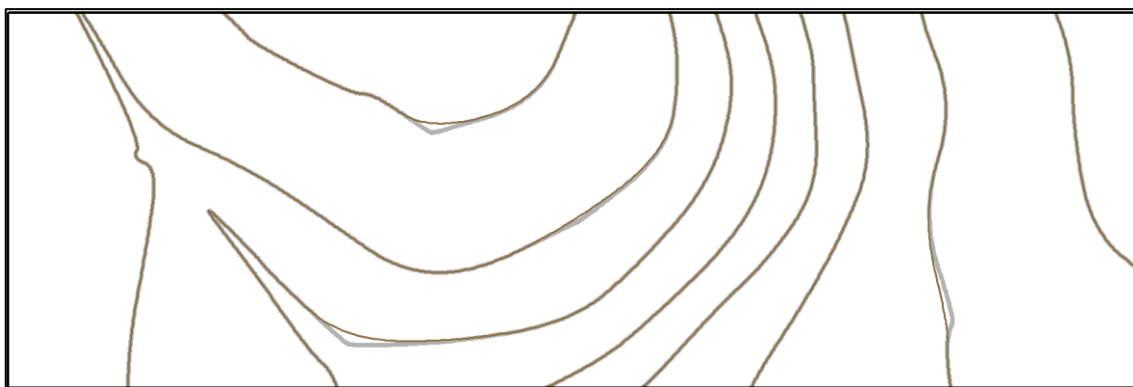


Obr. 6.6: Vliv omezení délky segmentu u generalizace metodou úhlového potenciálu.

### 6.2.6 Odstranění sousedních segmentů s různou délkou

Tento krok implementující pravidlo P2 z kap. 3.2 se aplikuje po dokončení generalizačního algoritmu, kdy jsou odstraněny krátké segmenty sousedící s dlouhými segmenty. Výpočet poměru  $r$  je podrobně popsán v kap. 4.2.7, viz (4.11). Z několika testovaných variant se jako optimální jevila hodnota poměru  $r=0.15$ , kdy se mohou dotýkat segment s nejvýše 6-ti násobnou délkou. U vyšších poměrů  $r$  by často po odstranění segmentu docházelo k protnutí výškového bufferu nebo k přílišnému překročení maximální délky segmentu  $d_{max}$ . Vrcholy segmentů jsou odebrány, resp. přeskočeny, jen v případě, že nedojde k protnutí výškového bufferu generalizovanou linií. Tento krok vylepší výsledek aplikovaného vyhlazovacího algoritmu a vrstevnice má hladší průběh (viz Obr. 6.7).





*Obr. 6.7: Odstranění krátkých segmentů generalizované vrstevnice (šedě před odstraněním, hnědě po odstranění)*

### 6.2.7 Postprocessing generalizovaných vrstevnic

Po dokončení generalizace je vhodné opět provést eliminaci příliš krátkých otevřených vrstevnic a uzavřených vrstevnic s příliš malou plochou stejně jako na začátku procesu generalizace. Ideální je ponechat totožné nastavení jako u jejich předzpracování viz kap. 6.2.1.

## 6.3 Vstupní data

V práci je využit digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR5G) tvořený bodovým mračnem s vysokou prostorovou hustotou 0.1 bodů/m<sup>2</sup>. Nadmořská výška je uváděna ve výškovém systému BpV s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,30 m v zalesněném terénu. DMR 5G je základní zdrojovou databází pro tvorbu vrstevnic určených pro mapy velkých měřítek a počítačové vizualizace výškopisu v územně orientovaných informačních systémech vysoké úrovně podrobnosti (Geoportál, 2019). Tato data jsou použita i pro připravované mapové dílo ZTM5, ze kterého byly pro potřeby poskytnuty vektorová data připravovaných vrstevnic. Tyto vrstevnice jsou v práci použity pro porovnání s výsledky vlastních generalizačních metod. Vrstevnice pro mapové dílo ZTM5 mají přesnější průběh díky dostupnosti povinných hran, zejména u vodstva. Dochází tak k výraznému vylepšení průběhu břehovek, což je patrné v testovacím území Hradec Králové, kap. 6.5.2.

### Předzpracování vstupních dat

U DMR 5G prošlo původní bodové mračno preprocessingem. Prvním krokem je georeferencování jednotlivých odrazů paprsků a transformace souřadnic do pracovního souřadnicového výškového systému. Následuje provedení robustní filtrace, která má za cíl klasifikovat body podle typu povrchu nebo objektu, na který dopadl laserový paprsek

a slouží také pro identifikaci chybných měření. Ačkoli se jedná o automatizovaný proces, výsledky musí být kontrolovány manuálně. Díky filtraci mohou být jednotlivé body klasifikovány do různých kategorií, například na body reliéfu, vegetace, zástavby, či jako chybná měření. Informace o začlenění jednotlivých bodů do klasifikačních tříd je důležitá pro následnou tvorbu digitálního modelu terénu (obsahuje pouze zemský povrch) nebo tvorbu digitálního modelu povrchu (obsahuje zástavbu i vegetaci).

Samotný poskytovatel, Zeměměřický úřad, kromě klasifikace a oprav chyb provádí také generalizaci bodového mračna. Jedná se o generalizaci v zemědělsky obhospodařovaných oblastech za použití gridu 5 x 5 m a v ostatních oblastech za použití gridu 1 x 1 m. Dále se také provádí interpolace výšky v oblastech, které neobsahují naměřená data, takové oblasti jsou například vodní plochy, místa zastíněná budovami, či hustou vegetací. Protože má model stále vysoké prostorové rozlišení, provádí se také další generalizace bodového mračna jeho ředěním (metoda „hoblování“ vyvinutou firmou Atlas, spol. s r.o.). Důležité je však zmínit, že i po výše uvedených generalizacích je pro tvorbu vrstevnic bodové mračno tvořící model velmi husté a podrobné, a proto je nutné aplikovat další generalizační postupy (Brázdil, 2012)

Při práci s DMR 5G se jako ideální přístup jeví lokální zpracování po mapových listech o rozměrech 2,0 x 2,5 km. Nevýhodou je nutnost ošetření průběhu vrstevnice na styku mapových listů. V práci nebyla tato problematika řešena.

Poskytnutá data představující bodová mračna jsou ve formátu *txt*, jednotlivé položky tvoří souřadnice bodů v souřadnicovém systému JTSK-East/North (EPSG:5514). Jeden mapový list je pokryt zhruba 440 000 body, avšak počet bodů je závislý na charakteru území. Ukázka vstupních dat je zobrazena v tabulce 6.1.

X	Y	Z
-485261.875000	-1116001.750000	244.300003
-485256.031250	-1116000.250000	244.190002
-485252.187500	-1116000.375000	244.289993

Tab. 6.1: Formát vstupních dat.

## 6.4 Testovací oblasti

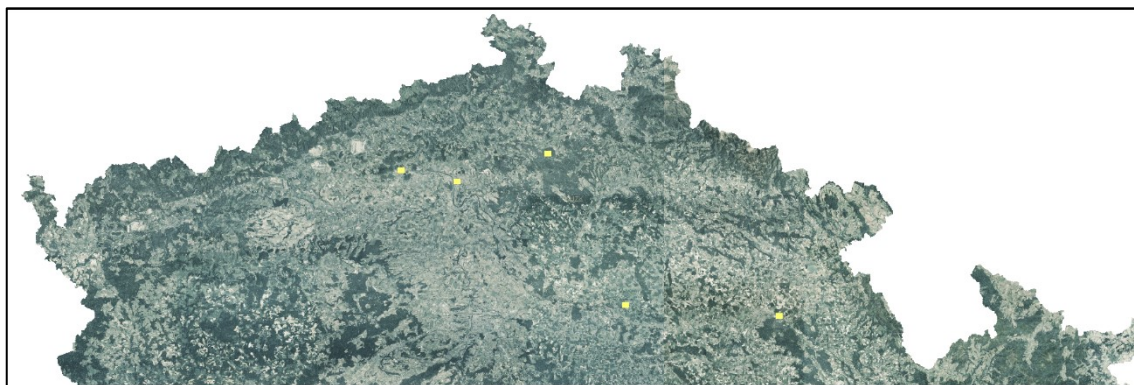
Pro otestování generalizačního algoritmu bylo vybráno pět lokalit, které byly zvoleny na základě specifického typu reliéfu. Vybrány byly převážně lokality s rovinným reliéfem (oblast Polabí), popř. poblíž vodních toků (Ploučnice, Orlice). Pro otestování chování generalizačního algoritmu v různých situacích byly vybrány i oblasti s větším sklonem (oblast Českého středohoří) (viz Obr. 6.8). Dalším požadavkem bylo pokrytí vybraných

mapových listů vrstevnicemi připravované mapy ZTM5, které byly následně použity pro porovnání generalizací vytvořených vrstevnic a vrstevnic vytvořených profesionálními kartografy.

Vybrané mapové listy jsou zobrazeny v tabulce 6.2. Pro každou lokalitu byl postup identický. Nejprve bylo provedeno předzpracování, poté byly vytvořeny vrstevnice se základním intervalem 1 m a výškové buffery, které byly následně generalizovány metodami představenými v této práci. Výsledky jsou porovnány se vstupními, tj. negeneralizovanými, vrstevnicemi a „referenčními“ vrstevnicemi poskytnutými Zeměměřickým úřadem. Vzhledem k faktu, že byly vytvořeny kartografem-profesionálem, předpokládáme, že mají vhodné kartografické parametry. Pro hodnocení výsledků generalizace byly použita pravidla v kap. 4.2.1, definující požadavky na generalizační algoritmus. Výpočet tvarových chyb vrstevnic je popsán v kap. 3.5.2. Polohová chyba je hodnocena pouze u metody úhlového potenciálu. Analýzy jsou prováděny nad vrstevnicemi před aplikováním vyhlazovacího algoritmu.

Název mapového listu	Lokalita
<b>DUBA97</b>	Oblast mezi řekou Labe a obcí Polepy
<b>HKRA31</b>	Povodí řeky Orlice u obce Blešno
<b>LITC75</b>	Úpatí Českého středohoří u obce Březno
<b>MIMO62</b>	Povodí řeky Ploučnice
<b>NYMB59</b>	Oblast rovin u obce Kouty

Tab. 6.2: Vybrané testované lokality (celkem 5)



Obr. 6.8: Vybrané testovací lokality.

## 6.5 Dosažené výsledky

Tato kapitola obsahuje přehled výstupů navržených generalizačních algoritmů a jejich zhodnocení dle kritérií z kap. 4.2.1. První algoritmus, modifikovaný Douglas-Peuckerův algoritmus, označíme zkratkou DPM, metodu generalizačního potenciálu jako GP.

### 6.5.1 Dubá 9-7

První vybrané území se nachází na mapovém listu Dubá 9-7. Oblast byla vybrána pro svou lokalizaci v Polabí, jedná se o rovinaté území, u kterého předpokládáme značnou oscilaci původních, tj. negeneralizovaných vrstevnic. Výškové buffery zde budou široké, šířky se budou pohybovat v řádech desítek metrů. Základní charakteristika je zobrazena v tabulce 6.3. Náhled je zobrazen na obrázku 6.9.

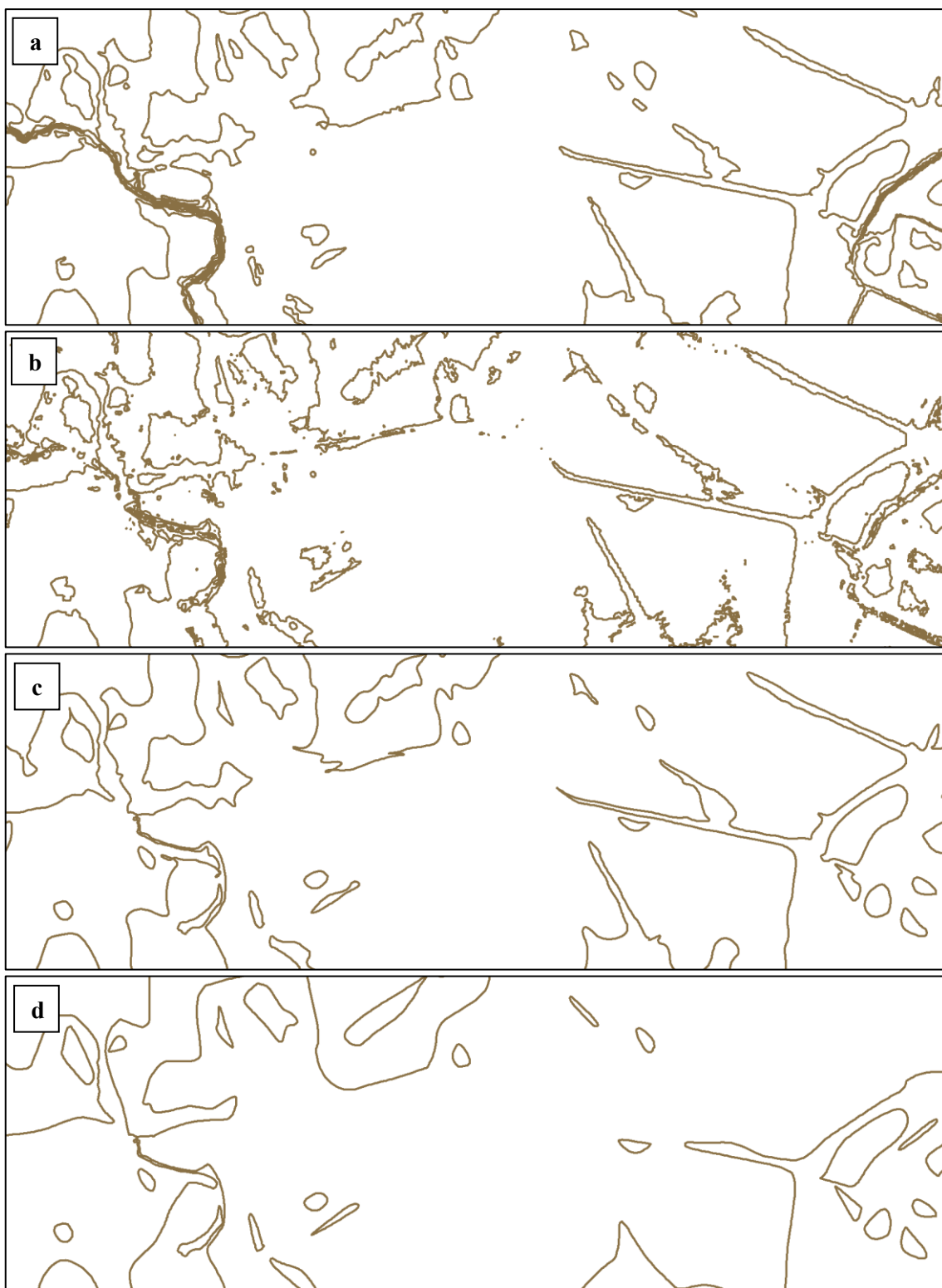
	$\bar{x}$	$\sigma$	min	max
Nadmořská výška [m]	153.15	3.02	146.45	174.64
Sklon [°]	1.90	3.25	-	-

Tab. 6.3: Základní charakteristika území Dubá 9-7.



Obr. 6.9: Náhled na testovací oblast Dubá 9-7.

Referenční vrstevnice mapového díla ZTM5 jsou zobrazeny na obrázku 6.10a a vrstevnice vytvořené lineární interpolací z bodového mračna DMR5G jsou zobrazeny na obrázku 6.10b. Základní interval u obou datových sad je 1 m. Vrstevnice generalizované metodou DPM jsou zobrazeny na obrázku 6.10c a vrstevnice generalizované metodou GP jsou zobrazeny na obrázku 6.10d. Podívejme se podrobněji na generalizované vrstevnice a jejich kvalitativní a kvantitativní parametry.



Obr. 6.10: Vrstevnice, mapový list Dubá 9-7 se základním intervalem 1m: a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP.

### Délky segmentů

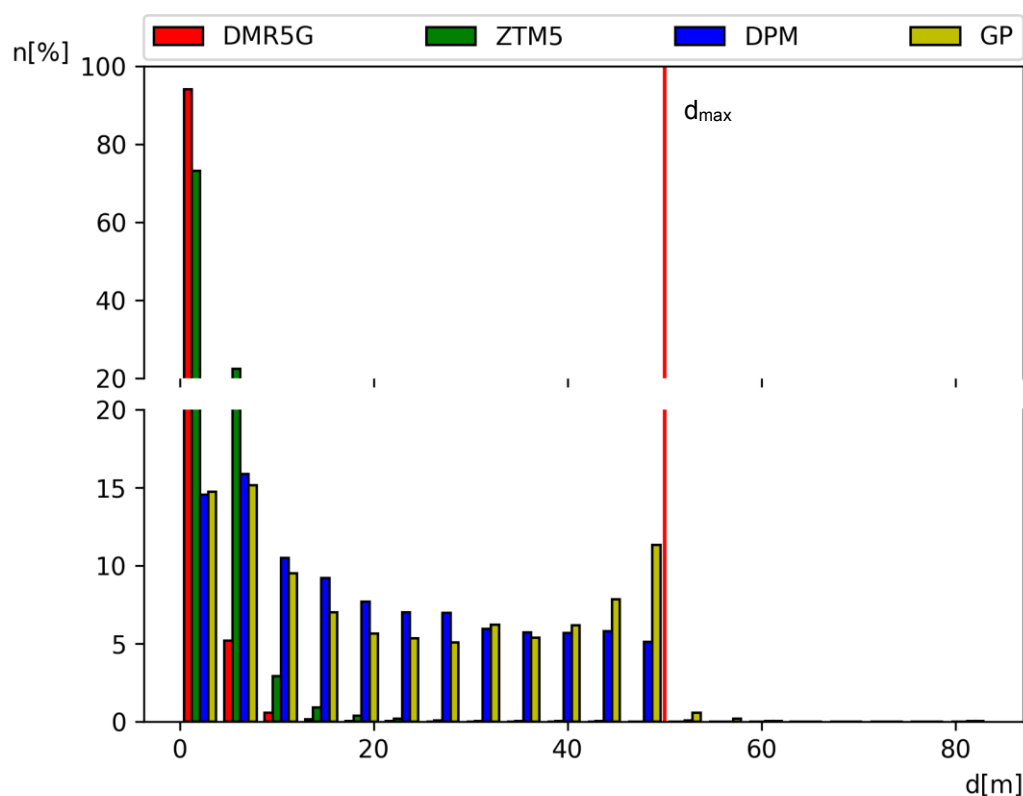
Tab. 6.4 ukazuje, jaký vliv měly generalizační metody na počet a délku segmentů vrstevnice. U metody DPM došlo ke snížení počtu segmentů o více než 95 % a celková délka segmentů se snížila o téměř 40 % oproti vstupním vrstevnicím. U metody GP došlo

k výraznějšímu snížení počtu segmentů i celkové délky. Počet segmentů se snížil téměř o 97 % a u celkové délky došlo ke snížení přes 53 %. Metoda GP poskytuje datově kompaktnější reprezentaci.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
Počet segmentů	107475	39258	4992	3411
Celková délka [m]	164941,42	125715,91	99060,90	76727,94
$\bar{d}$ [m]	1,53	3,20	19,84	22,49
$\sigma$ [m]	1,63	2,83	14,50	16,49

Tab. 6.4: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Dubá 9-7.

Kromě absolutních hodnot obou kritérií hraje důležitou roli i jejich rozložení ve výstupním souboru. Z histogramů rozložení délek segmentů (viz Obr. 6.11) je patrné, že oba navržené algoritmy, až na několik výjimek, dodržují omezení maximální délky segmentu  $d_{max}$ , které bylo stanoveno na 50 m a v grafu je označeno červenou linií. Je patrné, že metoda GP vytváří více segmentů u hraniční hodnoty maximálního omezení, zatímco metoda DPM vytváří větší počet kratších segmentů.



Obr. 6.11: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Dubá 9-7.

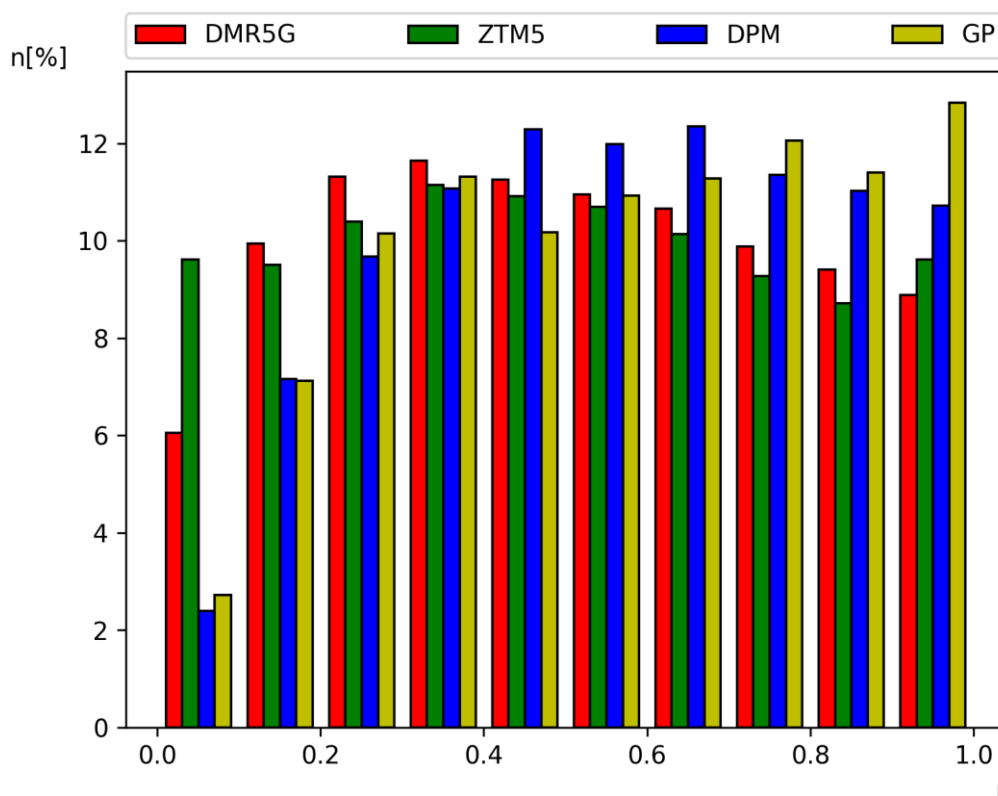
### Poměry délek sousedních segmentů

Ve srovnání s negeneralizovanými vrstevnicemi a vrstevnicemi ZTM5 došlo u obou navržených metod ke zvýšení průměrné hodnoty  $r$  poměru délek sousedních segmentů, to zhruba o více než 10 % (viz Tab. 6.5).

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{r}$	0,5067	0,4942	0,5582	0,5673
$\sigma$	0,2696	0,2835	0,2538	0,2631

Tab. 6.5: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Dubá 9-7.

Z vytvořených histogramů (viz Obr. 6.12) poměrů délek (3.11) sousedních segmentů je patrné, že metoda GP vytváří více segmentů se stejnou, resp. podobnou délkou, vrstevnice je v podstatě navzorkována s konstantním krokem. Metoda modifikovaného DPM generuje malý počet sousedních segmentů s velmi rozdílnou délkou. Podobných výsledků dosahuje i metoda GP. Obě metody mají méně než 4 % sousedních segmentů s hodnotou poměru  $r < 0.1$ .



Obr. 6.12: Histogramy poměrů délek segmentů  $r$  vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Dubá 9-7.

### Úhly mezi segmenty

Při analýze úhlů mezi sousedními segmenty bylo zjištěno, že metoda DPM generuje menší úhly než metoda GP (viz Tab. 6.6), segmenty se tedy protínají pod ostřejším úhlem.

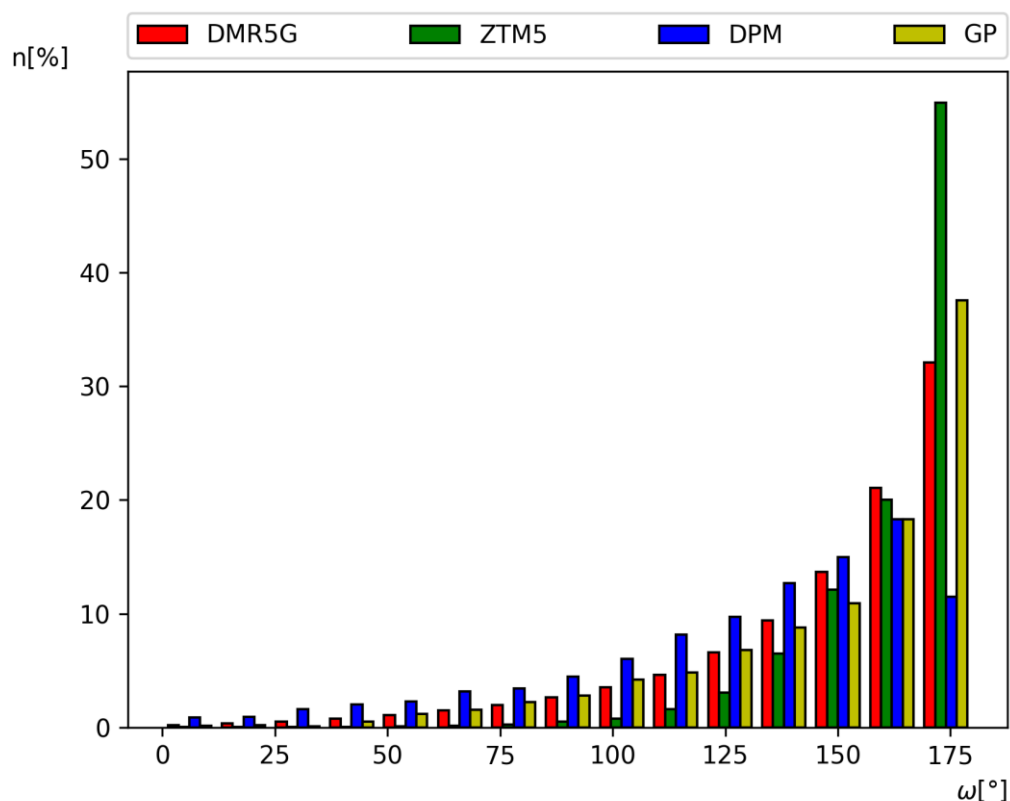


Tato vlastnost, známá u DP algoritmu, kdy je preferovaná tvarová věrnost před křivostí, není pro vrstevnice vhodná. Pro vjem opticky hladkých vrstevnic v kap. 3.3 uvádíme velikost úhlu  $170^\circ$ , přijatelné výsledky jsou i pro úhel  $160^\circ$ . Menší velikost úhlu již nevytváří opticky hladké vrstevnice. Je však nutné podotknout, že výsledky zobrazené níže jsou získány z generalizovaných vrstevnic před použitím vyhlazovacího algoritmu. Po aplikování vyhlazení většina segmentů svírá minimální požadovaný úhel  $170^\circ$ .

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{\omega} [^\circ]$	147,10	164,50	128,77	148,68
$\sigma [^\circ]$	32,74	19,20	38,91	32,16

Tab. 6.6: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Dubá 9-7.

Z histogramů je patrné, že u vrstevnic ZTM5G leží převážná většina prvků v intervalu  $170^\circ$  až  $180^\circ$ . Metoda DPM vytváří značné množství segmentů, přibližně 15 %, které svírají ostrý úhel, a zároveň vzniká malé množství, lehce přes 10 %, segmentů v intervalu  $170^\circ$  až  $180^\circ$  (viz Obr. 6.13).



Obr. 6.13: Histogramy úhlů  $\omega$  mezi segmenty vrstevnic (vstupní i generalizované) pro mapový list Dubá 9-7.

### Polohová chyba

Výsledky analýzy polohové chyby  $m_d$  (3.13) s využitím kritéria positional displacement (viz kap. 3.5.2) jsou zobrazeny v tabulce 6.7. Extrémní hodnoty, které jsou ve stovkách

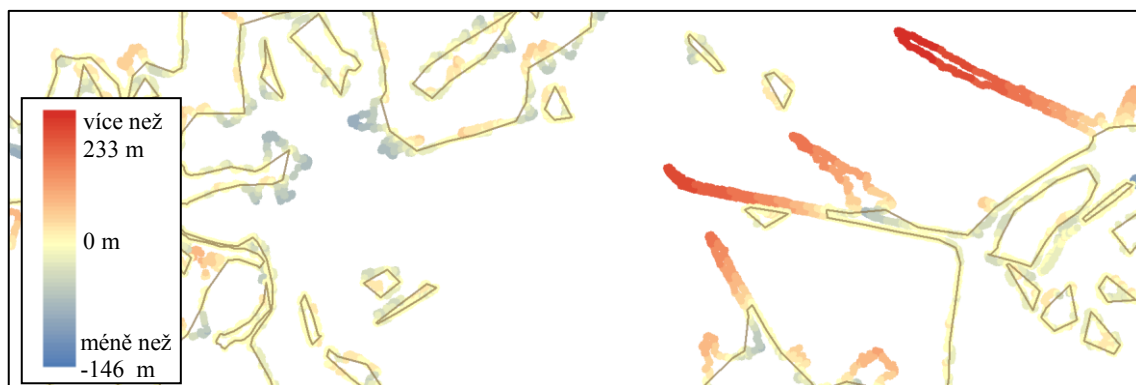


metrů, odpovídají chování vrstevnic a výškového bufferu v rovinatém území, kde je možná velká míra generalizace při zachování maximální povolené výškové chyby.

	min [m]	max [m]	$\bar{m}_d$ [m]	$\sigma$ [m]
$m_d$	-207,62	293,27	2,19	28,55
$ m_d $	0	293,27	10,66	26,58

Tab. 6.7: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou GP pro oblast Dubá 9-7.

Na obrázku 6.14 je polohová chyba vizualizována v závislosti na poloze. Pro vizualizaci byla zvolena spojitá barevná škála, kde jsou záporné hodnoty značeny modrou barvou, kladné hodnoty červenou barvou, hodnoty blízké nule jsou znázorněny béžovou barvou. Záporné hodnoty leží na levé straně od generalizované vrstevnice, kladné hodnoty se nachází napravo od generalizované vrstevnice. Z obrázku je patrné, že rozložení chyb v souboru bylo nerovnoměrné. Největší polohová chyba se nachází v rovinatém území na okraji silnice, kde se nachází násep. Při generalizaci byl tento výběžek odstraněn.



Obr. 6.14: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou GP pro oblast Dubá 9-7.

### Výšková chyba

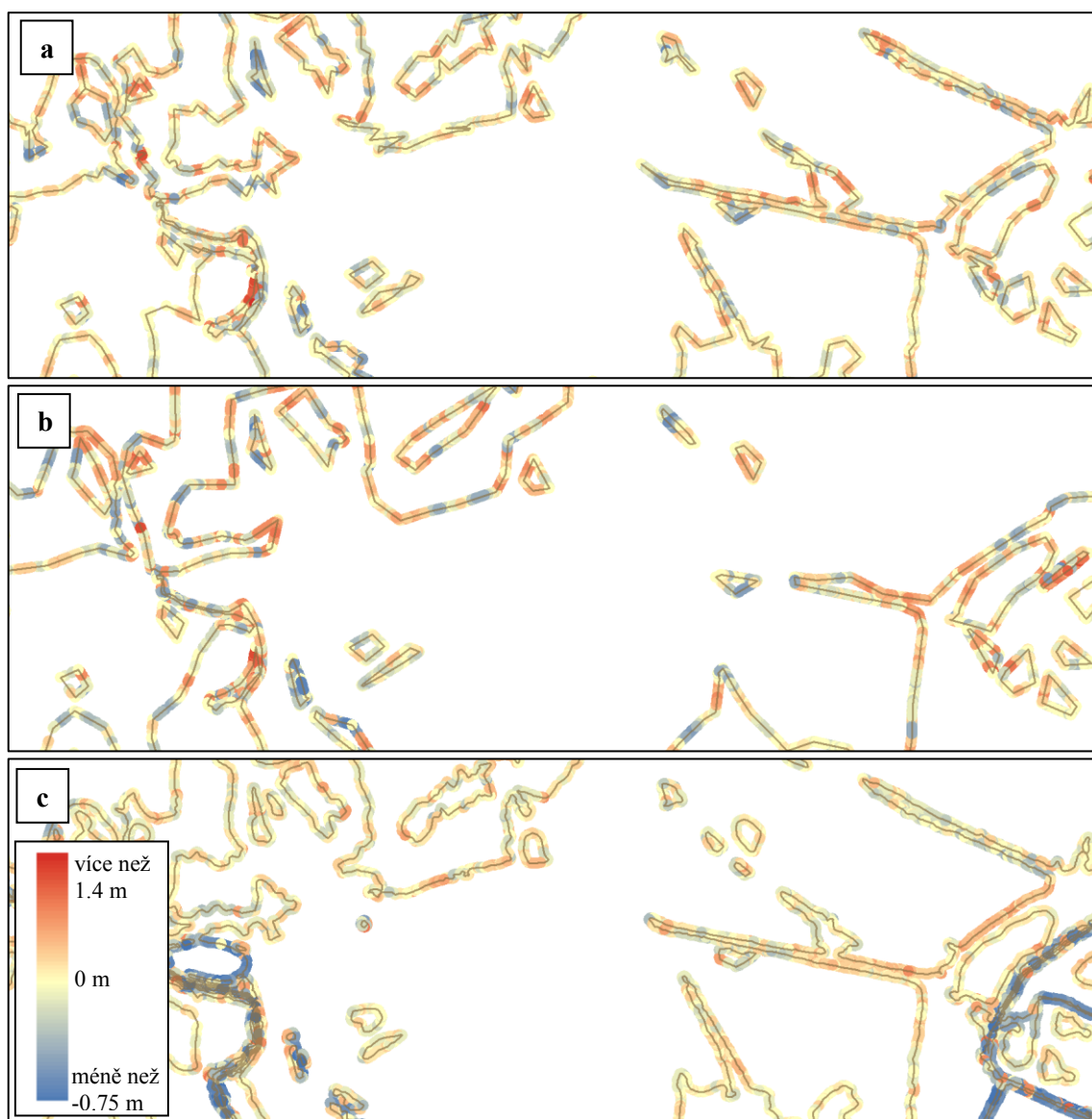
V tabulce 6.8 jsou zobrazeny hodnoty výškové chyby  $m_z$  (3.16) pro jednotlivé vrstevnicové modely. Výšková chyba byla určována vůči TIN DMT vytvořeného Delaunay triangulací z poskytnutého bodového mračka, které bylo považováno za bezchybné. Obě navržené metody mají podobné výsledky jednotlivých statistických ukazatelů, hodnota průměrné výškové chyby je menší než 0,1 m, a směrodatná odchylka menší než 0,15 m. U obou metod chyby dosahují malých hodnot a lze prohlásit, že většina segmentů, resp. testovacích průsečíků s digitálním modelem terénu, generalizované vrstevnice splňuje maximální výškovou chybu. U metody DPM je splněna maximální výšková chyba u 97,91 % testovaných průsečíků, metoda GP dosahuje velmi podobného výsledku 98,02 %. Extrémní hodnoty, tj. minimum i maximum potvrzují existenci segmentů, které nedodržují maximální výškovou chybu. V případě metody DPM je z celkových 66 383 testovaných průsečíků 1 389 nevhodných, u metody GP bylo zjištěno

1004 nevhodných průsečíků z celkového počtu 50 653. Tato chyba vznikla předzpracováním vrstevnic a výškového bufferu. Stalo se tak, při odstranění uzavřené části výškového bufferu, který mohl vymezovat lokální maximum nebo minimum, v takovém případě je možné, aby generalizovaná vrstevnice procházela tímto územím a byla zatížena výškovou chybou překračující stanovené maximum. Proces předzpracování je popsán v kapitole 6.2.1. V případě, že by nebyl aplikován krok eliminace nevhodných segmentů, byla by maximální výšková chyba dodržena u všech segmentů, avšak na úkor estetické kvality výsledných vrstevnic.

Metoda	$\min \{m_z\} \text{ [m]}$	$\max \{m_z\} \text{ [m]}$	$\bar{m}_z \text{ [m]}$	$\sigma \text{ [m]}$
<b>DPM</b>	-1,4371	2,1934	-0,0021	0,1078
<b> DPM </b>	0	2,1934	0,0612	0,0888
<b>GP</b>	-1,2987	2,1380	-0,0016	0,1248
<b> GP </b>	0	2,1380	0,0858	0,0906
<b>ZTM5</b>	-5,4829	1,3481	-0,0783	0,2576
<b> ZTM5 </b>	0	5,4829	0,1286	0,2366

Tab. 6.8: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Dubá 9-7.

Grafická reprezentace výškové chyby u jednotlivých modelů je zobrazena na obrázku 6.15. Z kartografického pohledu byla použita stejná technika jako v kap. 3.5.3. Pro vizualizaci byla zvolena spojitá škála barev, kde hodnoty blíží se minimu mají modrou barvu, hodnoty blíží se maximu červenou barvu a hodnoty blízké nule jsou vykresleny béžovou barvou. Vrstevnice ZTM5 vykazují velký extrém v oblasti vodního toku, což je způsobeno využitím břehovek a povinných hran při jejich vytváření. Obě navržené metody dosahují podobných výškových chyb a nelze vybrat jednoznačnou lokalitu, kde by byl pozorovatelný významný rozdíl.



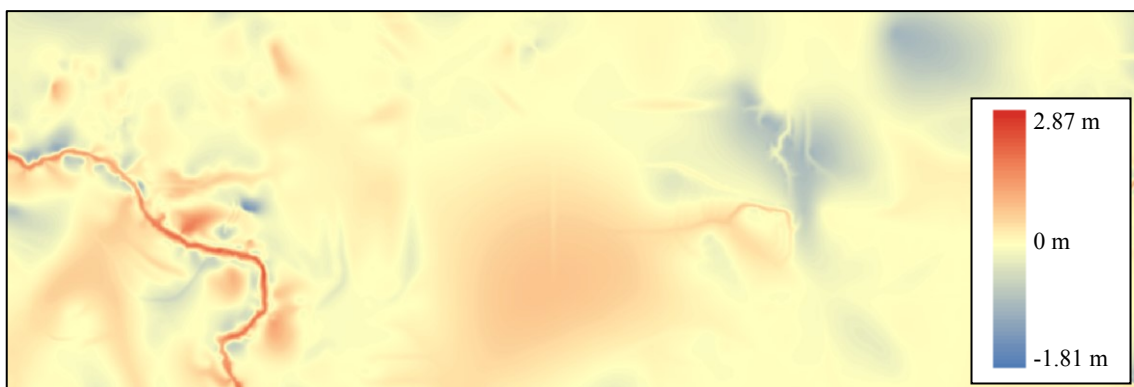
Obr. 6.15: Výšková chyba, mapový list Dubá 9-7: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5.

## Rozdíl DMT

Z vrstevnic ZTM5 a vlastních generalizovaných vrstevnic byly vytvořeny rastrové digitální modely terénu s velikostí buňky 1 m. Následně byl od modelu z generalizovaných vrstevnic odečten model z vrstevnic ZTM5 a byl vytvořen rozdílový rastr (viz Obr. 6.16). Statistické ukazatele rozdílového rastru jsou zobrazeny v tabulce 6.9. Pro vizualizaci byla zvolena spojitá škála barev, kde hodnoty blíží se minimu mají modrou barvu, hodnoty blíží se maximu červenou barvu a hodnoty blízké nule jsou vykresleny béžovou barvou. Opět se potvrzuje, že největší rozdíly jsou v oblasti vodního toku, kde byly při tvorbě vrstevnic ZTM5 k dispozici břehovky.

	$\min \{\Delta h\}$ [m]	$\max \{\Delta h\}$ [m]	$\overline{\Delta h}$ [m]	$\sigma$ [m]
$\Delta h$	-1,81	2,87	0,02	0,25

Tab. 6.9: Statistika rozdílového rastru pro oblast Dubá 9-7.



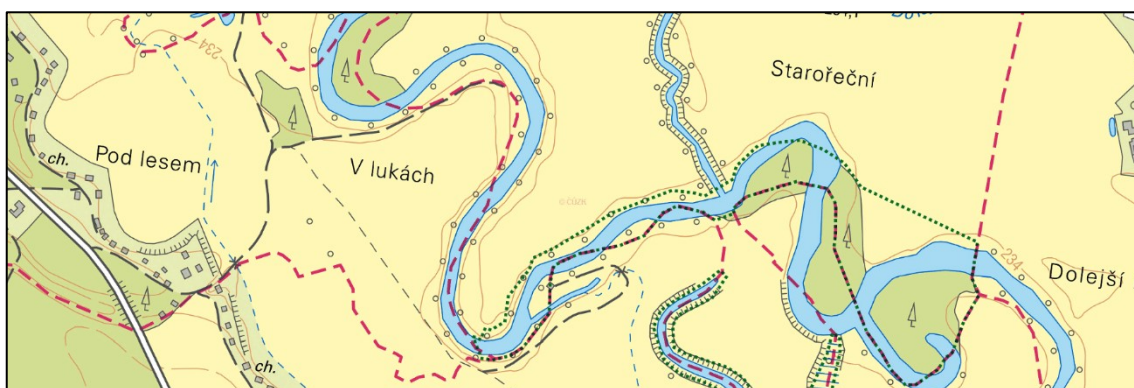
Obr. 6.16: Rozdílový rastr pro oblast Dubá 9-7.

### 6.5.2 Hradec Králové 3-1

Druhá vybraná oblast se nachází v povodí řeky Orlice, kde se vyskytují říční meandry a antropogenní tvary. Vrstevnice v takové oblasti mají komplikovaný průběh. Při porovnání s vrstevnicemi ZTM5, které byly vytvořeny s použitím břehovek a povinných hran, předpokládáme v místech říčního toku vrstevnice s artefakty a výrazné tvarové rozdíly. Základní charakteristika území je zobrazena v tabulce 6.10, náhled je zobrazen na obrázku 6.17.

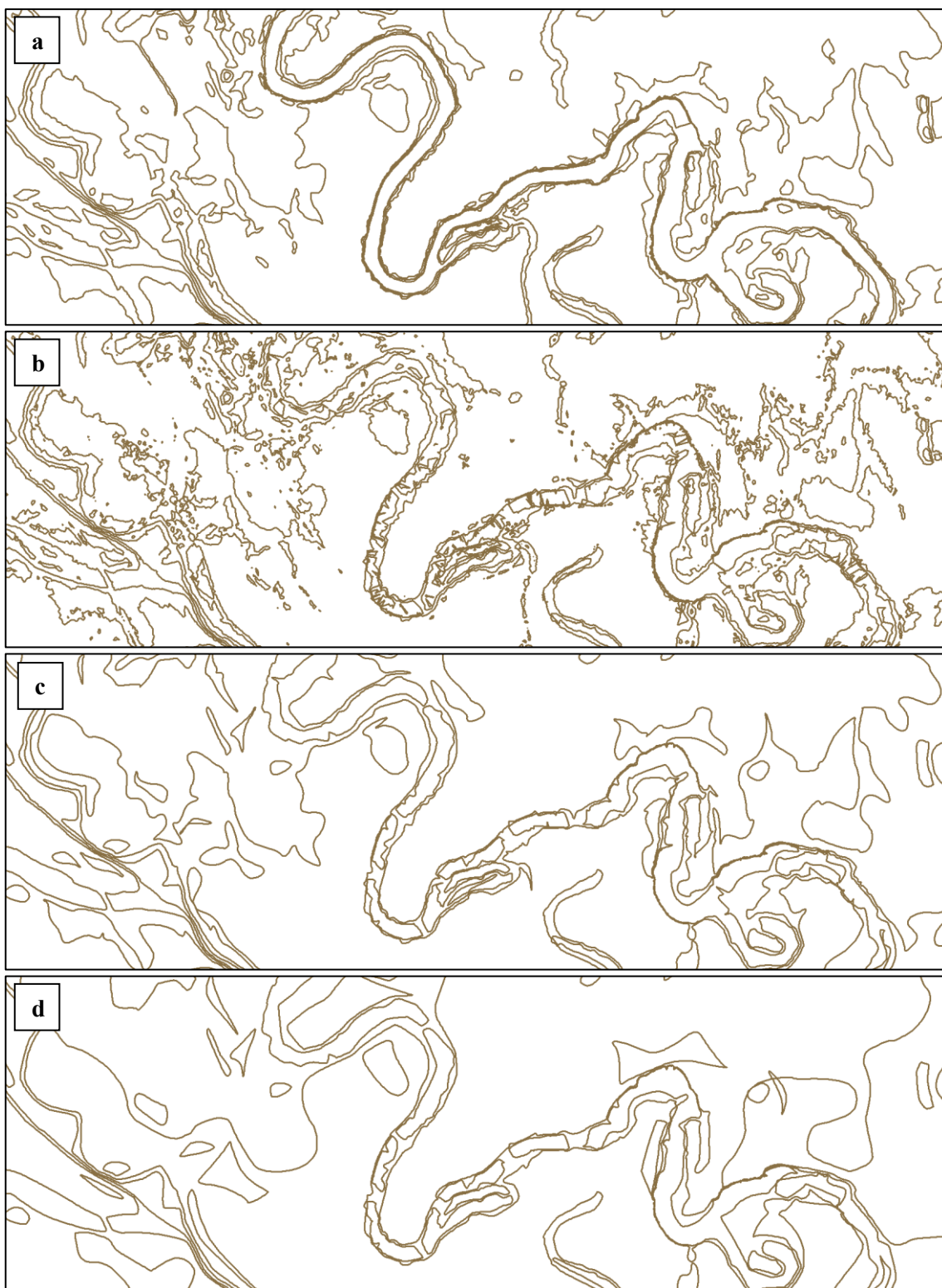
	$\bar{x}$	$\sigma$	min	max
<b>Nadmořská výška [m]</b>	238.20	5.54	230.49	271.36
<b>Sklon [°]</b>	2.92	3.89	-	-

Tab. 6.10: Základní charakteristika území Hradec Králové 3-1.



Obr. 6.17: Náhled na testovací oblast Hradec Králové 3-1.

Referenční vrstevnice mapového díla ZTM5 jsou zobrazeny na obrázku 6.18a a vrstevnice vytvořené lineární interpolací z bodového mračna DMR5G jsou zobrazeny na obrázku 6.18b. Vrstevnice generalizované metodou DPM jsou na obrázku 6.18c a vrstevnice generalizované metodou GP jsou zobrazeny na obrázku 6.18d. Základní interval všech zobrazených vrstevnic je 1 m. Kvantitativní a kvalitativní parametry vrstevnic jsou analyzovány níže v kapitole.



Obr. 6.18: Vrstevnice, mapový list Hradec Králové 3-1 se základním intervalem 1m: a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP.

### Délky segmentů

Tab. 6.11 ukazuje vliv jednotlivých generalizačních metod na počet a délku segmentů vrstevnice. U metody DPM došlo ke snížení počtu segmentů o více než 93 % a celková délka vrstevnic se snížila téměř o 30 % oproti vstupním vrstevnicím. U metody GP došlo

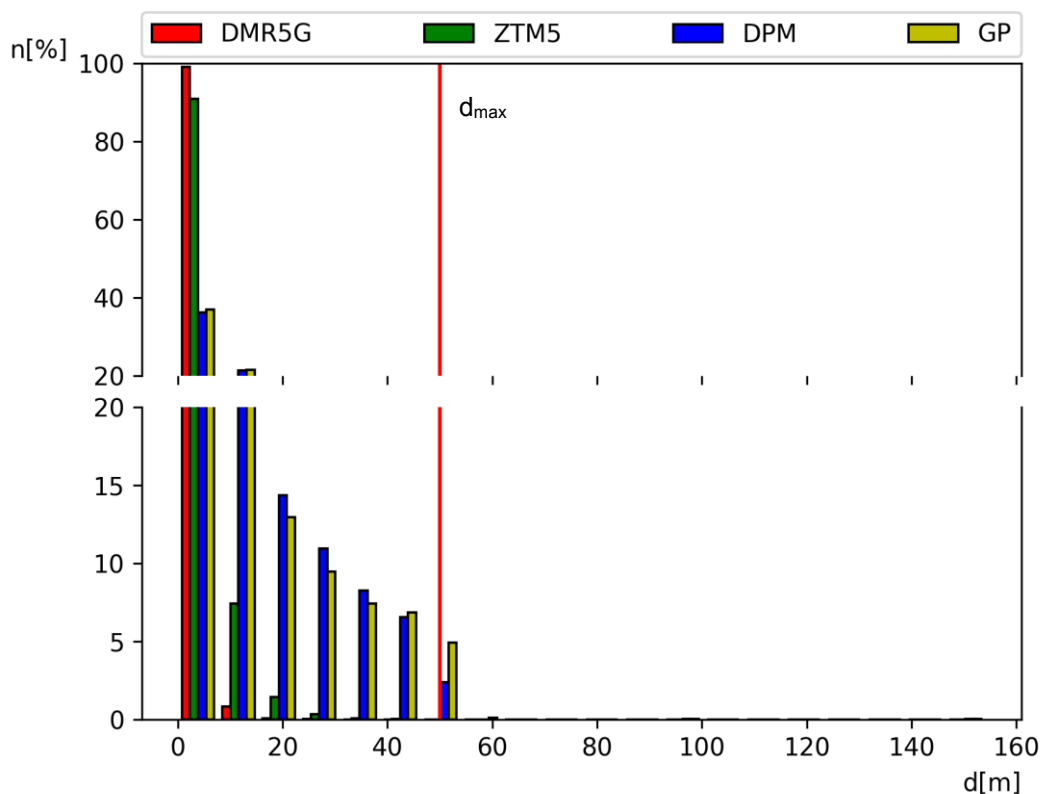


ke snížení počtu segmentů o více než 94 % a celková délka vrstevnic se snížila téměř o 40 %. Stejně jako u prvního testovacího území i zde si lze všimnout, že metoda GP poskytuje kompaktnější reprezentaci.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
Počet segmentů	168734	56559	11382	9480
Celková délka [m]	260829,51	210685,63	183594,52	157604,94
$\bar{d}$ [m]	1,55	3,73	16,13	16,63
$\sigma$ [m]	1,69	3,55	13,35	14,37

Tab. 6.11: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1.

Rozložení délek segmentů je zobrazeno na obrázku 6.19. Z histogramů je patrné, že obě navržené metody generalizace vykazují pro toto území podobnou distribuci délek segmentů. U vstupních vrstevnic z DMR5G mají téměř všechny segmenty délku do 10 m, což je způsobeno množstvím malých, často uzavřených, vrstevnic, které vznikly lineární interpolací v místech koryta řeky a v přilehlém okolí. Tyto nevhodné vrstevnice byly odstraněny eliminací během předzpracování vrstevnic. Metoda GP vytváří více segmentů o maximální povolené délce 50 m, než metoda DPM.



Obr. 6.19: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Hradec Králové 3-1.

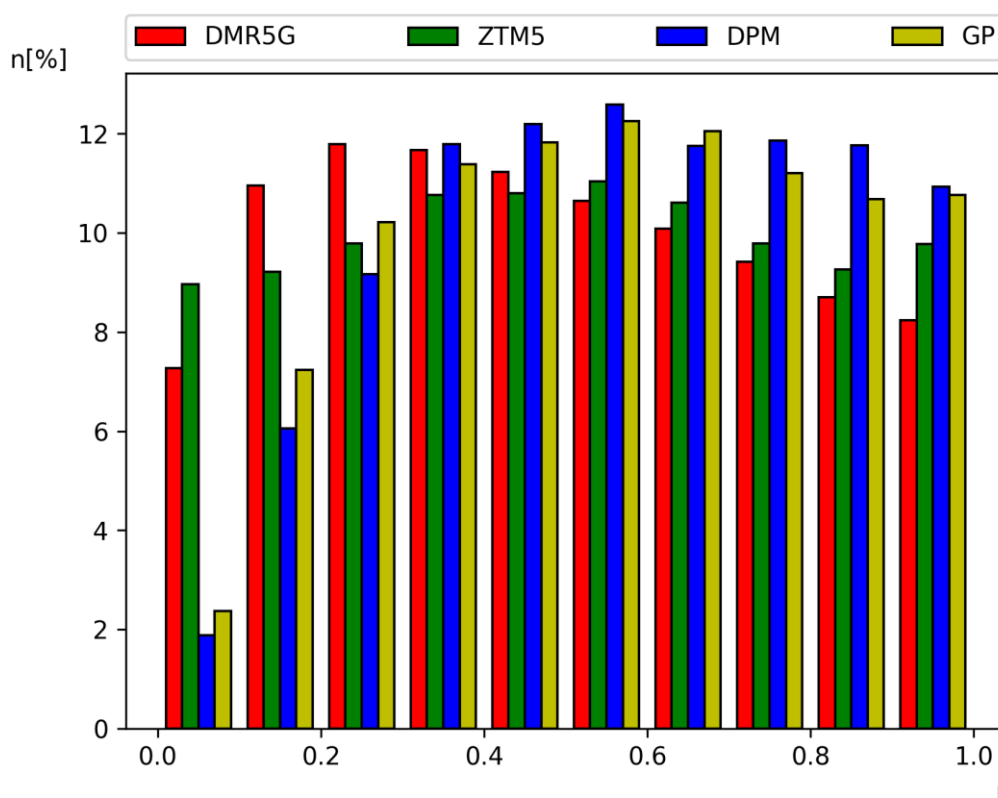
### Poměry délek sousedních segmentů

I v případě tohoto testovacího území došlo u obou generalizačních metod k nárůstu průměrného poměru délek  $r$  sousedních segmentů oproti negeneralizovaným vrstevnicím a vrstevnicím ZTM5 (viz Tab. 6.12).

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{r}$	0,4883	0,5044	0,5685	0,5546
$\sigma$	0,2721	0,2818	0,2493	0,2549

Tab. 6.12: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1.

Z vytvořených histogramů (viz Obr. 6.20) poměrů délek sousedních segmentů je patrné, že metoda GP vytváří více segmentů s menším poměrem délek než metoda DPM. To může být způsobeno vlastností DP algoritmu, kdy je preferovaná tvarová věrnost před křivostí. Vrstevnice ZTM5 mají velmi vyrovnanou distribuci poměrů délek  $r$  sousedních segmentů.



Obr. 6.20: Histogramy poměrů délek segmentů  $r$  vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Hradec Králové 3-1.

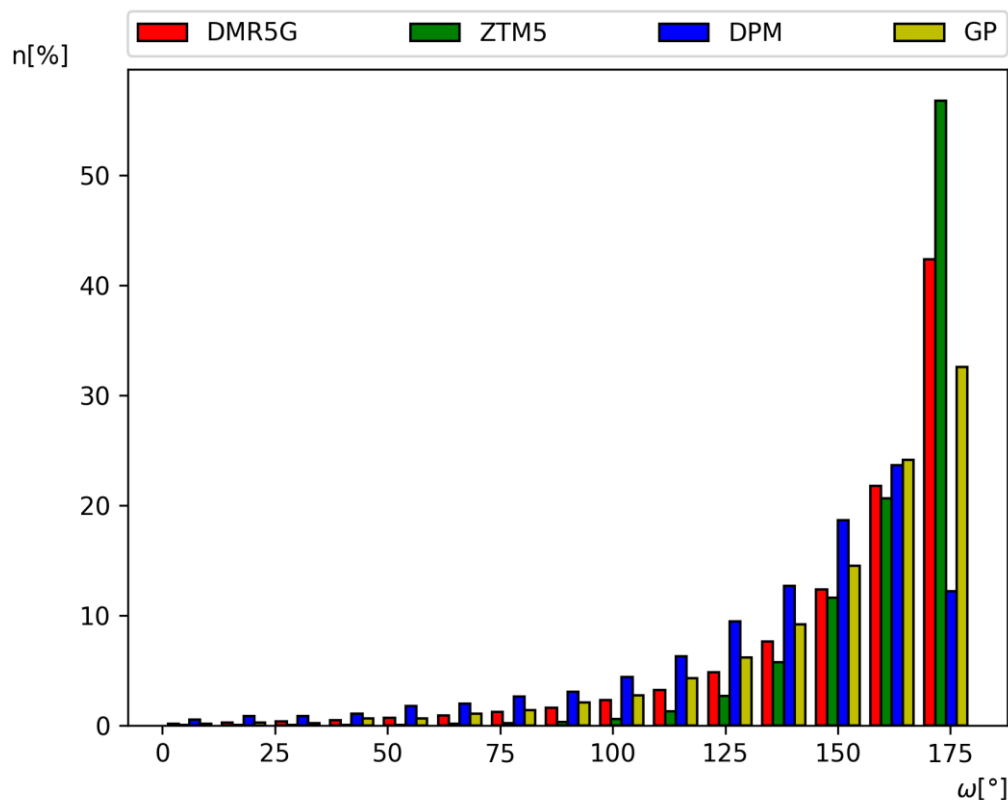
### Úhly mezi segmenty

Při analýze úhlů mezi sousedními segmenty bylo opět zjištěno, že metoda DPM generuje menší úhly než metoda GP (viz Tab. 6.13). Tato vlastnost metody DPM způsobuje vznik opticky méně hladkých vrstevnic s nadbytečným množstvím oscilací.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{\omega}$ [°]	154,36	165,53	136,52	150,38
$\sigma$ [°]	28,83	17,68	34,87	29,14

Tab. 6.13: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1.

Výše zjištěné vlastnosti potvrzuje i histogram distribuce úhlů mezi sousedními segmenty (viz Obr. 6.21), kde má metoda GP více než dvojnásobně větší počet úhlů nad 175° než metoda DPM.



Obr. 6.21: Histogramy úhlů  $\omega$  mezi segmenty vrstevnic (vstupní i generalizované) pro mapový list Hradec Králové 3-1.

### Polohová chyba

Výsledky analýzy polohové chyby  $m_d$  jsou zobrazeny v tabulce 6.14. Extrémy opět odpovídají chování vrstevnic a výškového bufferu v rovinatém říčním území.

	min [m]	max [m]	$\bar{m}_d$ [m]	$\sigma$ [m]
$m_d$	-156,04	205,28	0,83	17,23
$ m_d $	0	205,28	6,00	16,18

Tab. 6.14: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Hradec Králové 3-1.

Na obrázku 6.22 je vizualizována polohová chyba metody GP. Je zajímavé, že největší polohová chyba nevzniká v oblasti velkého říčního toku, ale v oblasti chatové zástavby s malým potokem, vpravo na obrázku. Právě kombinace širokého výškového bufferu



a dlouhého úzkého potoku zapříčinila vznik této vysoké polohové chyby, kdy byl během generalizace výběžek vstupní vrstevnice definující tento potok odstraněn.



Obr. 6.22: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Hradec Králové 3-1.

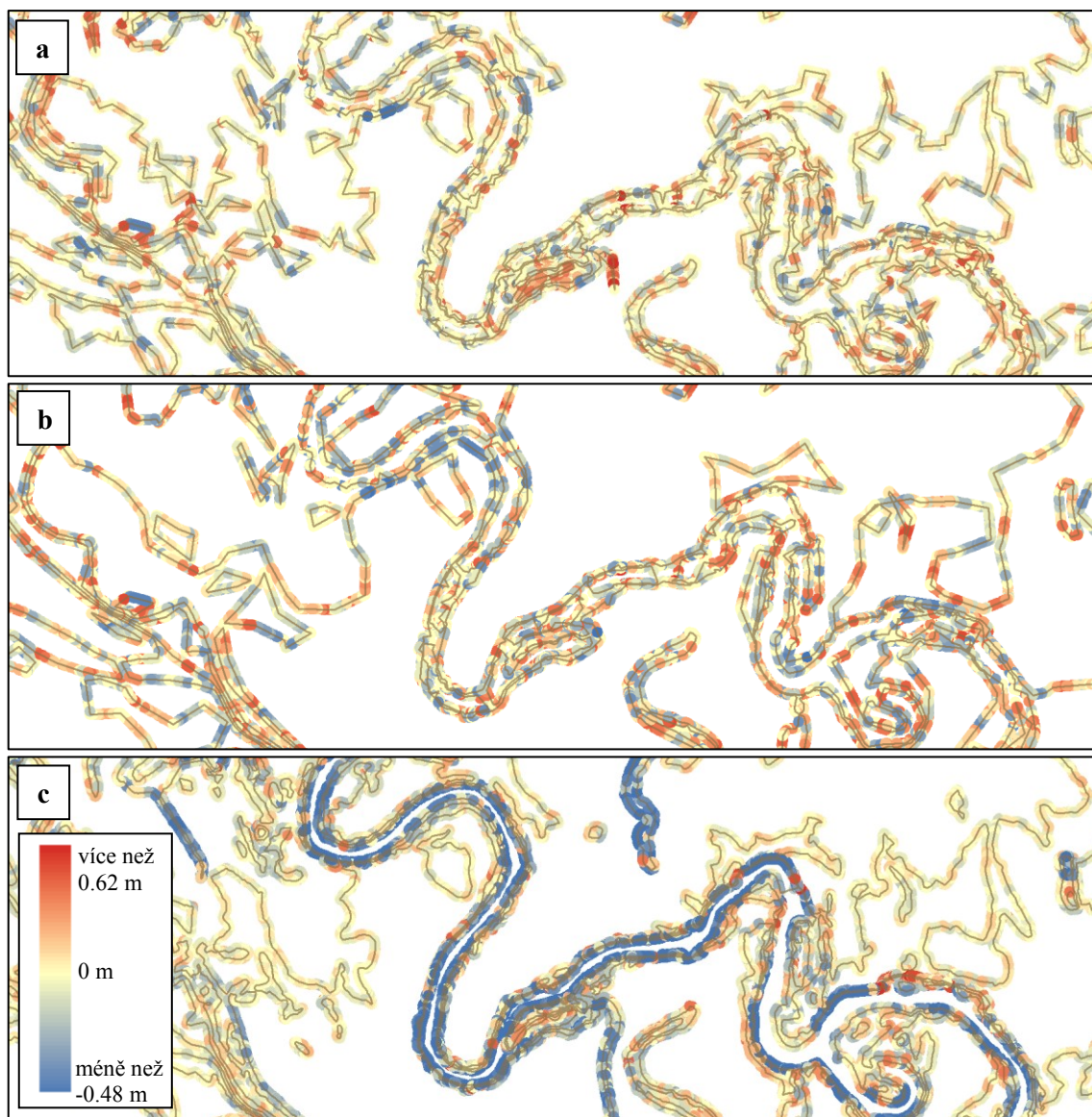
### Výšková chyba

V tabulce 6.15 jsou zobrazeny hodnoty výškové chyby  $m_z$  pro jednotlivé vrstevnicové modely. Stejně jako v případě prvního testovacího území je průměrná výšková chyba obou generalizačních metod menší než 0,1 m, a směrodatná odchylka menší než 0,15 m. U metody DPM je splněna maximální výšková chyba u 98,23 % testovaných průsečíků, metoda GP opět dosahuje velmi podobného výsledku 98,32 %. V případě metody DPM je z celkových 121 801 testovaných průsečíků 2 155 nevhodných, u metody GP bylo zjištěno 1731 nevhodných průsečíků z celkového počtu 102 801. Příčina vzniku chyby je totožná s příčinou popsanou u prvního testovacího území.

Metoda	min $\{m_z\}$ [m]	max $\{m_z\}$ [m]	$\bar{m}_z$ [m]	$\sigma$ [m]
DPM	-1,4522	2,8532	-0,0006	0,1010
DPM	0	2,8532	0,0641	0,0781
GP	-0,9440	1,6385	-0,0052	0,1282
GP	0	1,6385	0,0965	0,0845
ZTM5	-3,3728	1,1800	-0,0800	0,2836
ZTM5	0	3,3728	0,1333	0,2628

Tab. 6.15: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Hradec Králové 3-1.

Největší hodnoty se opět nachází v oblastech s komplikovaným tvarem, tedy v místech průběhu břehu vodního toku (viz Obr. 6.23). V této lokalitě se také projevují největší rozdíly s vrstevnicemi ZTM5.



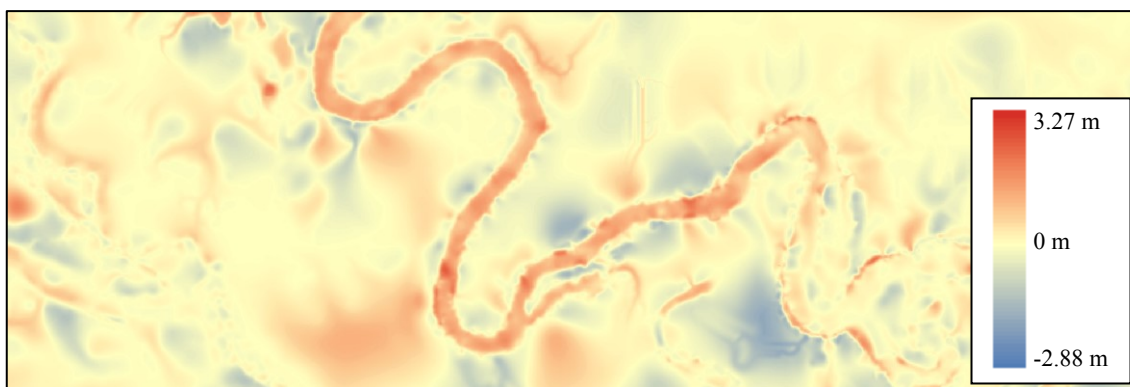
Obr. 6.23: Výšková chyba, mapový list Hradec Králové 3-1: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5

## Rozdíl DMT

V tabulce 6.6 jsou zobrazeny statistické ukazatele pro rozdílový rastr. Připomeňme, že rozdílový rastr vznikl odečtením DMT interpolovaného z vrstevnic ZTM5 od DMT interpolovaného z vrstevnic generalizovaných metodou GP. Rozdílový rastr je zobrazen na obrázku 6.24, ze kterého je patrný velký vliv využití břehovek a povinných hran při vytváření vrstevnic v oblasti koryta říčního toku.

	min { $\Delta h$ } [m]	max { $\Delta h$ } [m]	$\overline{\Delta h}$ [m]	$\sigma$ [m]
$\Delta h$	-2,88	3,27	0,04	0,33

Tab. 6.16: Statistika rozdílového rastru pro oblast Hradec Králové 3-1.



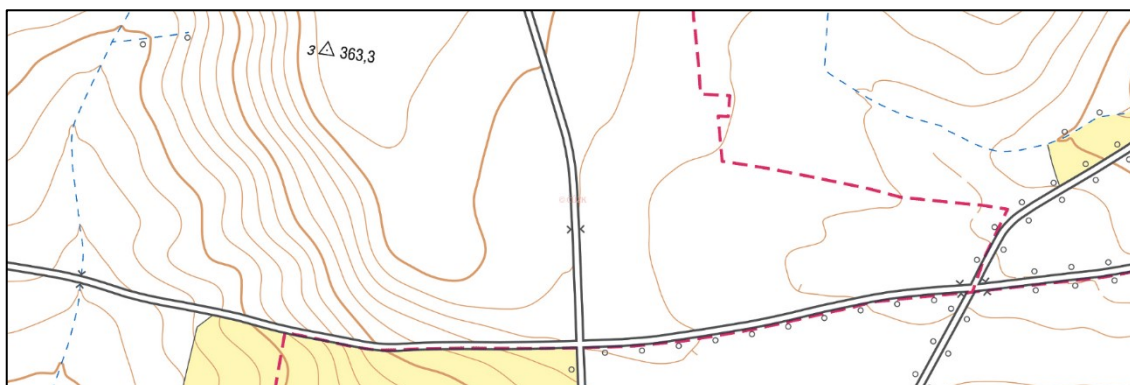
Obr. 6.24: Rozdílový rastr pro oblast Hradec Králové 3-1.

### 6.5.3 Litoměřice 7-5

Třetí vybraná oblast se nachází v Českém středohoří. Oproti předchozím testovacím lokalitám, se v daném území nenachází výrazný říční tok a reliéf je poměrně sklonitý. Ve vybrané lokalitě se nachází úpatí několika kopců. V takové oblasti bude větší množství vrstevnic a výškové buffery zde budou úzké, a to v řádu několika metrů. Vznik velkých polohových chyb bude výjimečný. Základní charakteristika je zobrazena v tabulce 6.17, náhled je zobrazen na obrázku 6.25.

	$\bar{x}$	$\sigma$	min	max
Nadmořská výška [m]	359.19	23.35	317.57	455.31
Sklon [°]	4.20	3.83	-	-

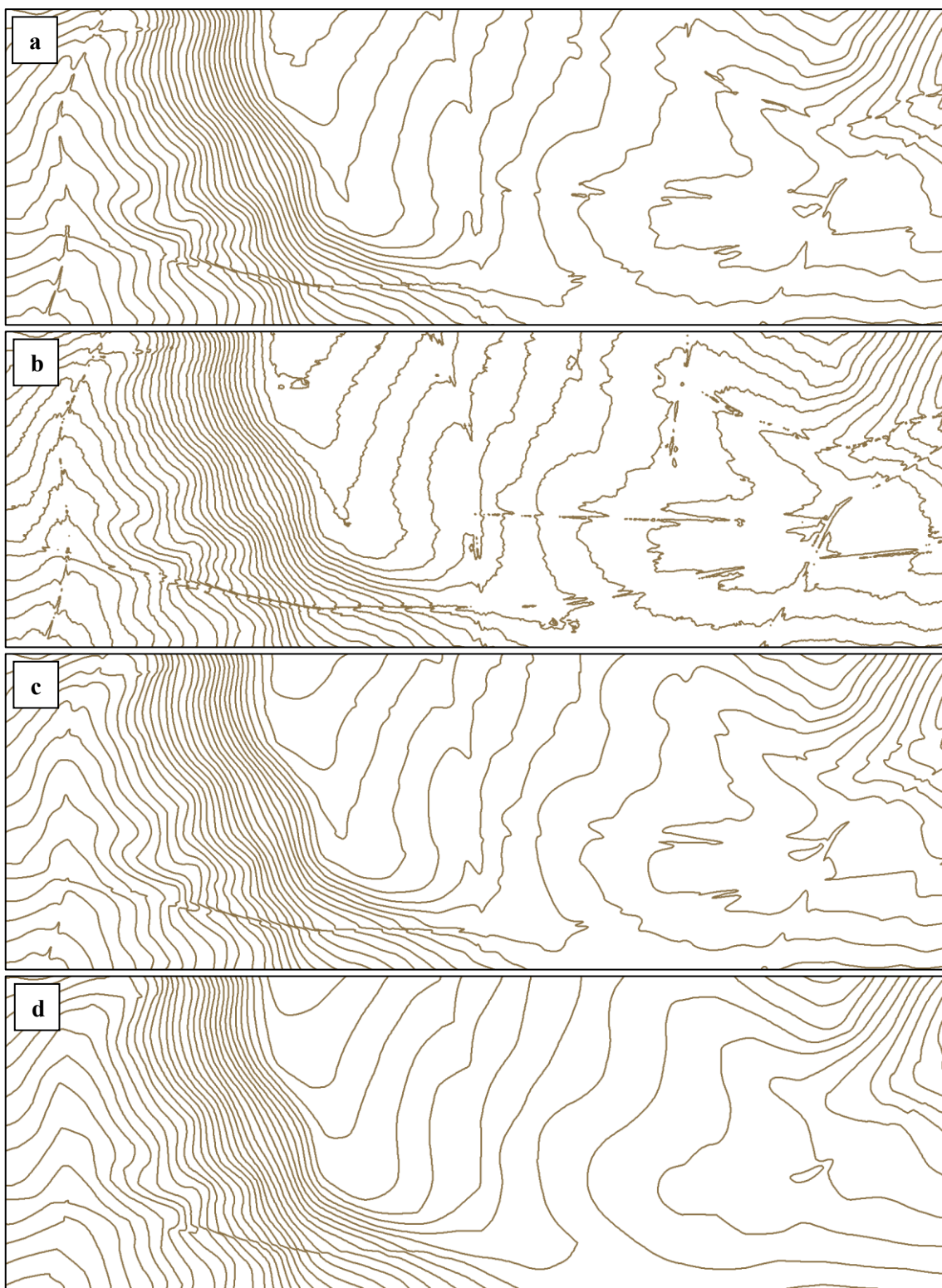
Tab. 6.17: Základní charakteristika území Litoměřice 7-5.



Obr. 6.25: Náhled na testovací oblast Litoměřice 7-5, ZM10.

Referenční vrstevnice mapového díla ZTM5 jsou zobrazeny na obrázku 6.26a a vrstevnice vytvořené lineární interpolací z bodového mračna DMR5G jsou zobrazeny na obrázku 6.26b. Základní interval u obou datových sad je 1 m. Vrstevnice generalizované metodou DPM jsou zobrazeny na obrázku 6.26c vrstevnice generalizované metodou GP jsou zobrazeny na obrázku 6.26d.





*Obr. 6.26: Vrstevnice, mapový list Litoměřice 7-5 se základním intervalem 1m: a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP.*

### **Délky segmentů**

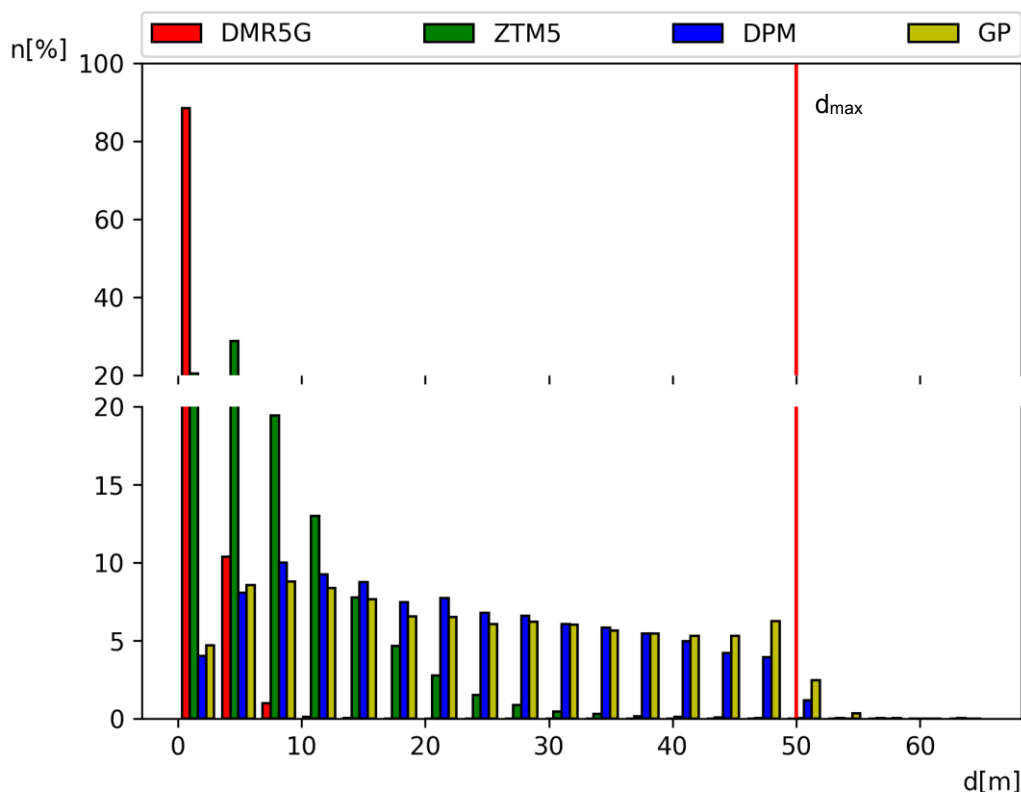
Tabulka 6.18 ukazuje vliv generalizačních metod na počet a délku segmentu vrstevnice. U metody DPM došlo ke snížení počtu segmentů o více než 93 % a celková délka vrstevnic se snížila téměř o 6 %. U metody GP došlo ke snížení počtu segmentů téměř

o 94 % a celková délka se snížila o více než 9 %. Malé snížení celkové délky odpovídá charakteru lokality s větším sklonem. V takové oblasti vrstevnice málo oscilují a výškový buffer je úzký, z toho vyplývá, že není možná tak velká míra generalizace, jako je tomu u vrstevnic v rovinatých územích.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
Počet segmentů	230404	42140	15654	14124
Celková délka [m]	369688,01	350686,65	348657,43	335468,38
$\bar{d}$ [m]	1,60	8,32	22,27	23,75
$\sigma$ [m]	1,43	6,34	13,27	14,44

Tab. 6.18: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5.

Z histogramů rozložení délek segmentů (viz Obr. 6.27) je patrné rovnoměrné rozdělení pro obě generalizační metody. Je však patrné, že z důvodu úzkého výškového bufferu není možné při generalizaci vytvářet dlouhé rovné úseky. Nejvíce segmentů, téměř 30 %, se nachází v intervalu s délkou 5 – 15 m.



Obr. 6.27: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Litoměřice 7-5.

### Poměry délek sousedních segmentů

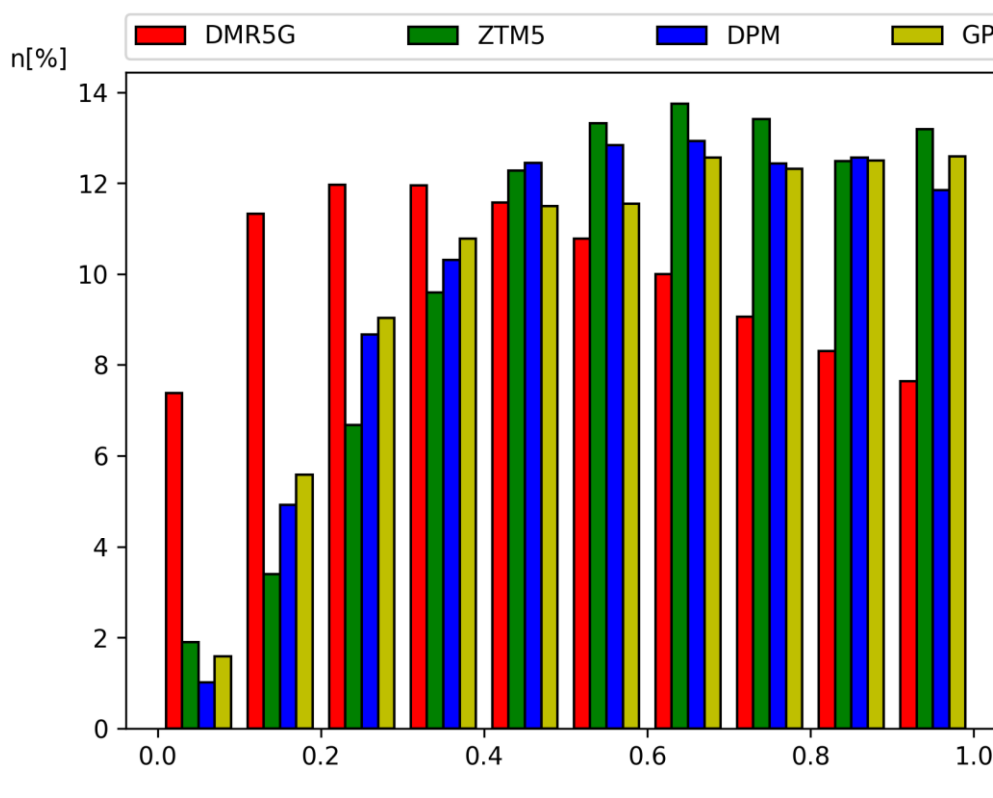
Tabulka 6.19 zobrazuje poměry délek sousedních segmentů. Podle průměrné hodnoty, která je menší než 0,5, u vstupních vrstevnic interpolovaných z DMR5G, lze prohlásit, že

průběh vrstevnic není hladký. Výsledky generalizačních metod by měly vytvářet vrstevnice s vizuálně hladším průběhem (viz Obr 6.26).

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{r}$	0,4806	0,6077	0,5900	0,5860
$\sigma$	0,2695	0,2402	0,2417	0,2509

Tab. 6.19: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5.

Z vytvořených histogramů (viz Obr. 6.28) poměrů délek sousedních segmentů je patrné, že vstupní vrstevnice obsahují příliš mnoho sousedních segmentů s velmi rozdílnou délkou. Z obrázku je také patrné, že obě generalizační metody výrazně vylepšily průběh segmentů a více jak 60 % segmentů má  $r < 0.5$ . Histogramy generalizačních metod jsou velmi podobné histogramu vytvořeného z vrstevnic ZTM5.



Obr. 6.28: Histogramy poměrů délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Litoměřice 7-5.

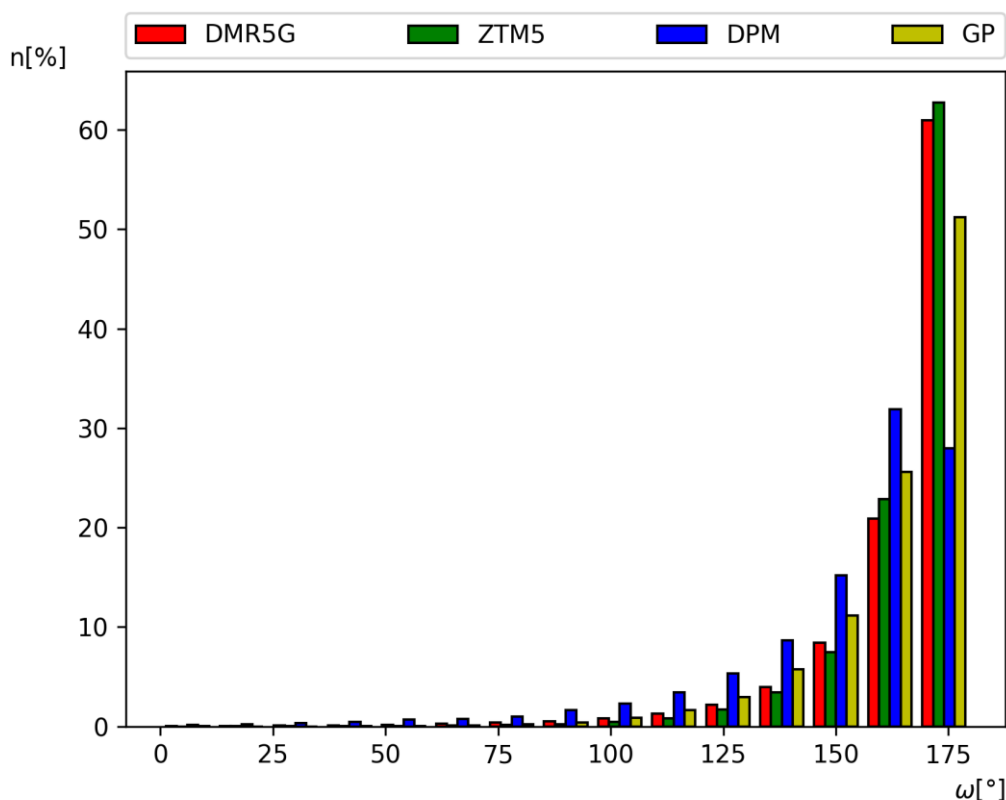
### Úhly mezi segmenty

I v případě třetího testovacího území si lze všimnout, že metoda DPM vytváří sousední segmenty svírající menší úhel než segmenty vrstevnic vytvořených metodou GP. Rozdíl je však menší než v předchozích případech (viz Tab. 6.20), nedochází zde tak často k oscilacím.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{\omega}$ [°]	165,00	166,90	151,39	162,93
$\sigma$ [°]	19,02	14,83	26,98	17,24

Tab. 6.20: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5.

Předchozí zjištění se odráží i ve vytvořených histogramech (viz Obr. 6.29). Metoda GP vytváří přes 50 % segmentů, které svírají úhel větší než 170°. Takový výsledek je slibný pro vytváření plynulých a hladkých vrstevnic. Zajímavé je i porovnání histogramu vstupních vrstevnic interpolovaných z DMR5G a vrstevnic ZTM5, které jsou velmi podobné. Je to způsobeno sklonitým reliéfem testovací oblasti, kdy na rozdíl od rovinatých oblastí, nevznikají silně oscilující vrstevnice a nevhodné artefakty v podobě malých vrstevnic v různých lokálních sníženinách nebo vyvýšeninách. Je patrné, že v místech s většími i menšími sklony mají generalizované vrstevnice podobné úhly mezi jednotlivými segmenty, výsledné linie mají tedy podobnou křivost.



Obr. 6.29: Histogramy úhlů mezi segmenty (vstupní i generalizované) vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5.

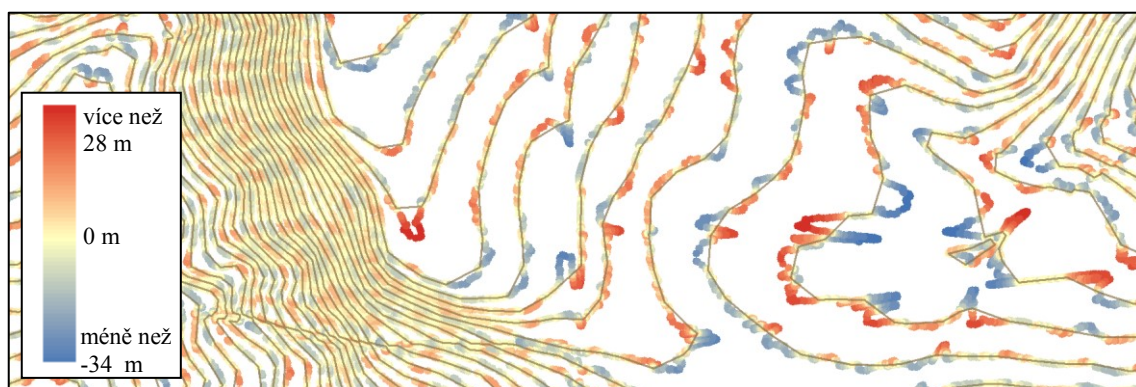
### Polohová chyba

Výsledky analýzy polohové chyby  $m_d$  jsou zobrazeny v tabulce 6.21. Oproti předchozím testovacím územím si můžeme všimnout až 5x menších extrémních hodnot maxima a minima. Malé hodnoty jsou očekávatelné z důvodu úzkého výškového bufferu.

	min [m]	max [m]	$\bar{m}_d$ [m]	$\sigma$ [m]
$m_d$	-50,07	61,30	-0,04	3,07
$ m_d $	0	61,30	1,53	2,66

Tab. 6.21: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Litoměřice 7-5.

Na obrázku 6.30 je patrné, že ke vzniku výraznější polohové chyby dochází v sedle, kde jsou výškové buffery jednotlivých vrstevnic širší. Daným územím protéká také úzký potok. Naopak v místech s větším sklonem dochází ke vzniku minimální polohové chyby, protože výškový buffer nedovoluje vyšší míru generalizace.



Obr. 6.30: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Litoměřice 7-5.

### Výšková chyba

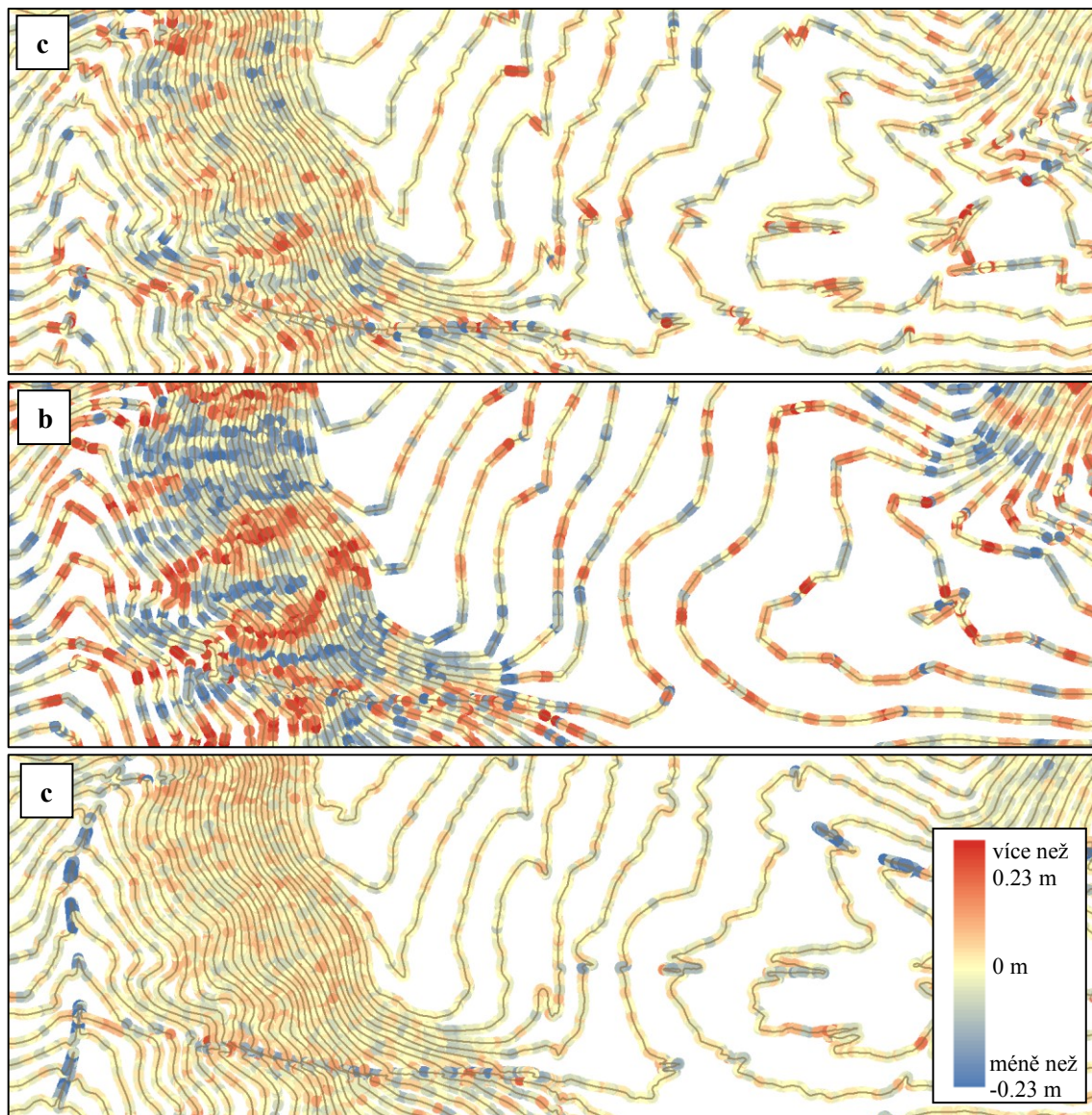
V tabulce 6.22 jsou zobrazeny hodnoty výškové chyby  $m_z$ . Hodnoty pro vstupní vrstevnice a vrstevnice ZTM5 jsou velmi podobné. Generalizační metody vykazují podobné výsledky jako u předchozích testovacích lokalit. U metody DPM je splněna maximální výšková chyba u 99,73 % testovaných průsečíků, metoda GP dosahuje velmi podobného výsledku 99,83 %. V případě metody DPM je z celkových 223 045 testovaných průsečíků 613 nevhodných, u metody GP bylo zjištěno pouze 358 nevhodných průsečíků z celkového počtu 210 669. Toto jsou velmi slibné výsledky, které však byly v oblastech se sklonitým reliéfem očekávány, protože nedošlo k přílišné eliminaci vrstevnic během předzpracování, jako je tomu v rovinatých oblastech.

Metoda	min $\{m_z\}$ [m]	max $\{m_z\}$ [m]	$\bar{m}_z$ [m]	$\sigma$ [m]
DPM	-3,0930	0,9768	-0,0011	0,0816
$ DPM $	0	3,0930	0,0515	0,0633
GP	-1,1790	1,0965	-0,0047	0,1192
$ GP $	0	1,1790	0,0929	0,0748
ZTM5	-1,3138	1,2888	-0,0184	0,0750
$ ZTM5 $	0	1,3138	0,0513	0,0577

Tab. 6.22: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Litoměřice 7-5.



Z obrázku 6.31 je patrné větší zatížení polohovou chybou u vrstevnic vytvořených metodou GP, která umožňuje větší míru generalizace, než metoda DPM, která více zachovává původní tvar vrstevnice. V případě vrstevnic ZTM5 je opět potvrzen vliv břehovek na výsledek generalizace, resp. výškovou chybu.



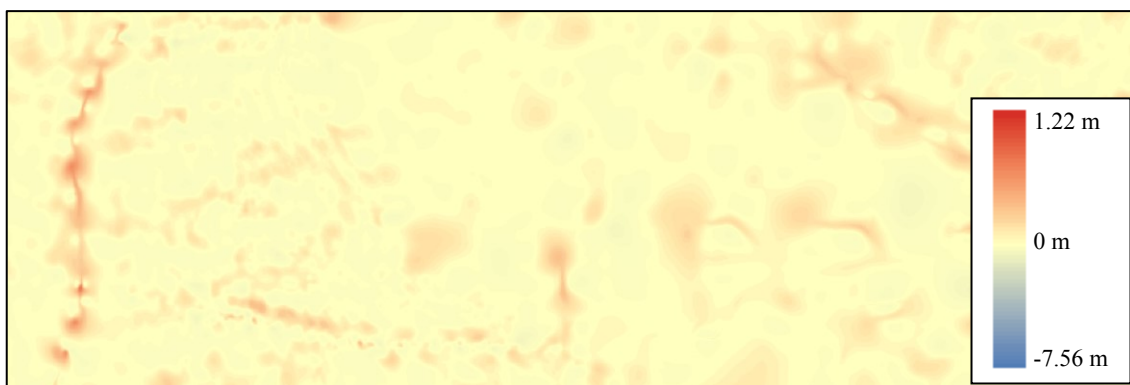
Obr. 6.31: Výšková chyba, mapový list Litoměřice 7-5: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5

## Rozdíl DMT

Rozdílový rastr (viz Obr. 6.32) potvrzuje možnou nízkou míru generalizace v lokalitách s vyšším sklonem. Výsledkem je velká podobnost obou, z vrstevnic vytvořených, DMT. Rozdíl se projevuje pouze v oblastí úzkého říčního toku. Statistické ukazatele pro rozdílový buffer jsou zobrazeny v tabulce 6.23.

	min { $\Delta h$ } [m]	max { $\Delta h$ } [m]	$\overline{\Delta h}$ [m]	$\sigma$ [m]
$\Delta h$	-7,56	1,22	0,01	0,10

Tab. 6.23: Statistika rozdílového rastru pro oblast Litoměřice 7-5.



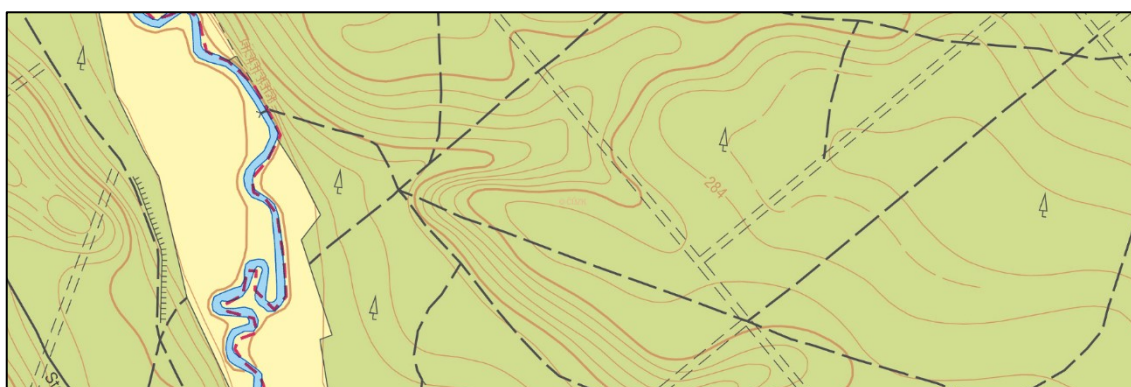
Obr. 6.32: Rozdílový rastr pro oblast Litoměřice 7-5.

## 6.5.4 Mimoň 6-2

Čtvrtá vybraná testovací oblast se nachází v povodí řeky Ploučnice. Řeka tvoří meandry, které se zařezávají do reliéfu a vznikají tak specifické terénní tvary. V některých místech, kde se vyskytují skály nebo je svah příliš strmý svah bude doházet ke slévání vrstevnic a tvorbě velmi úzkých bufferů. Podél říčního toku by měl být výškový buffer široký, ale výsledný tvar vrstevnic ovlivňuje absence břehovek. Základní charakteristika je zobrazena v tabulce 6.24. Náhled je zobrazen na obrázku 6.33.

	$\bar{x}$	$\sigma$	min	max
Nadmořská výška [m]	280.39	9.40	259.33	319.61
Sklon [°]	3.98	5.55	-	-

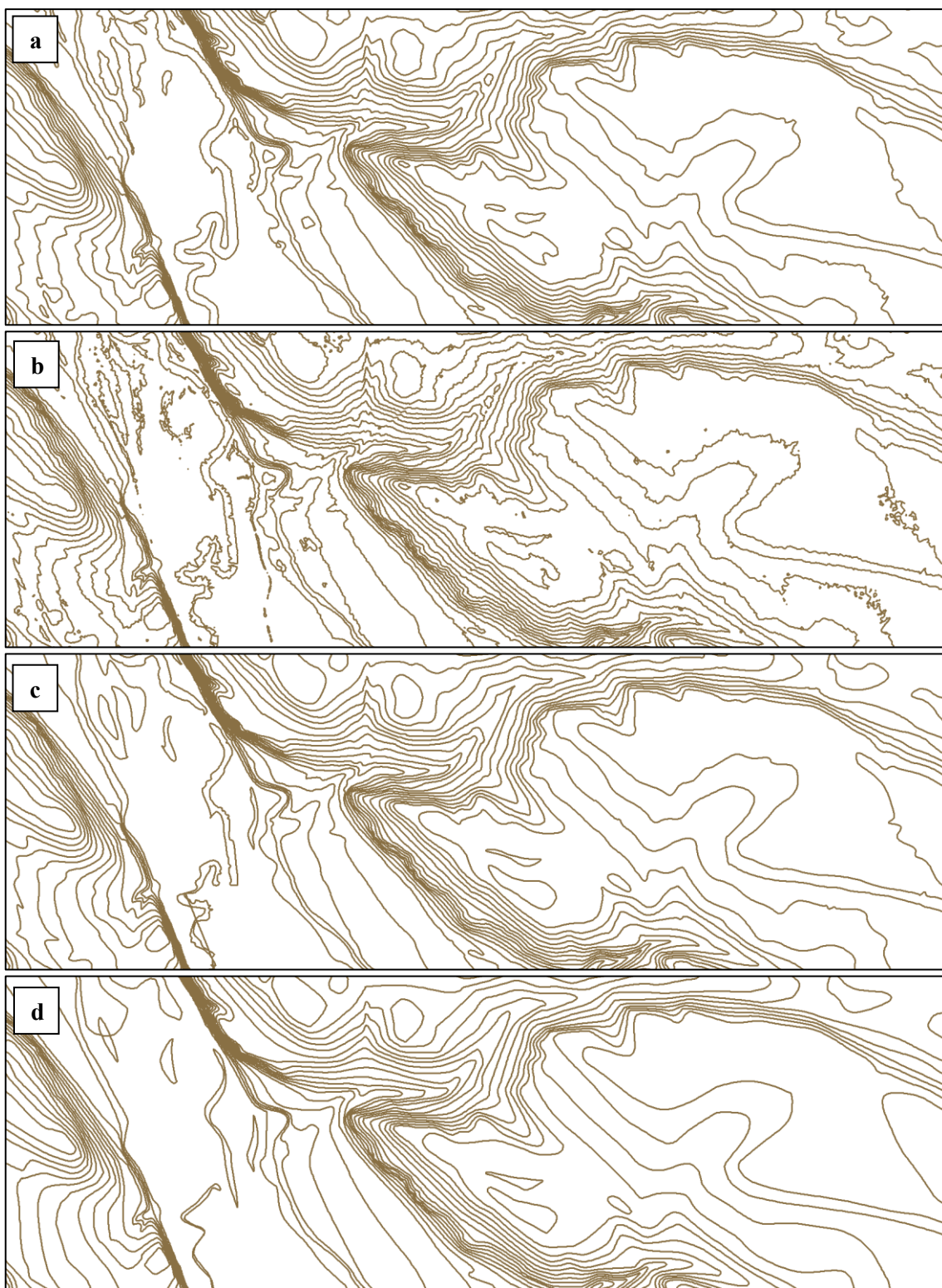
Tab. 6.24: Základní charakteristika území Mimoň 6-2.



Obr. 6.33: Náhled na testovací oblast Mimoň 6-2, ZM10.

Referenční vrstevnice mapového díla ZTM5 jsou zobrazeny na obrázku 6.34a a vrstevnice vytvořené lineární interpolací z bodového mračka DMR5G jsou zobrazeny na obrázku 6.34b. Vrstevnice generalizované metodou DPM jsou zobrazeny na obrázku 6.34c a vrstevnice generalizované metodou GP jsou zobrazeny na obrázku 6.34d.





Obr. 6.34: Vrstevnice, mapový list Mimoň 6-2 se základním intervalem 1m: a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP.

### Délky segmentů

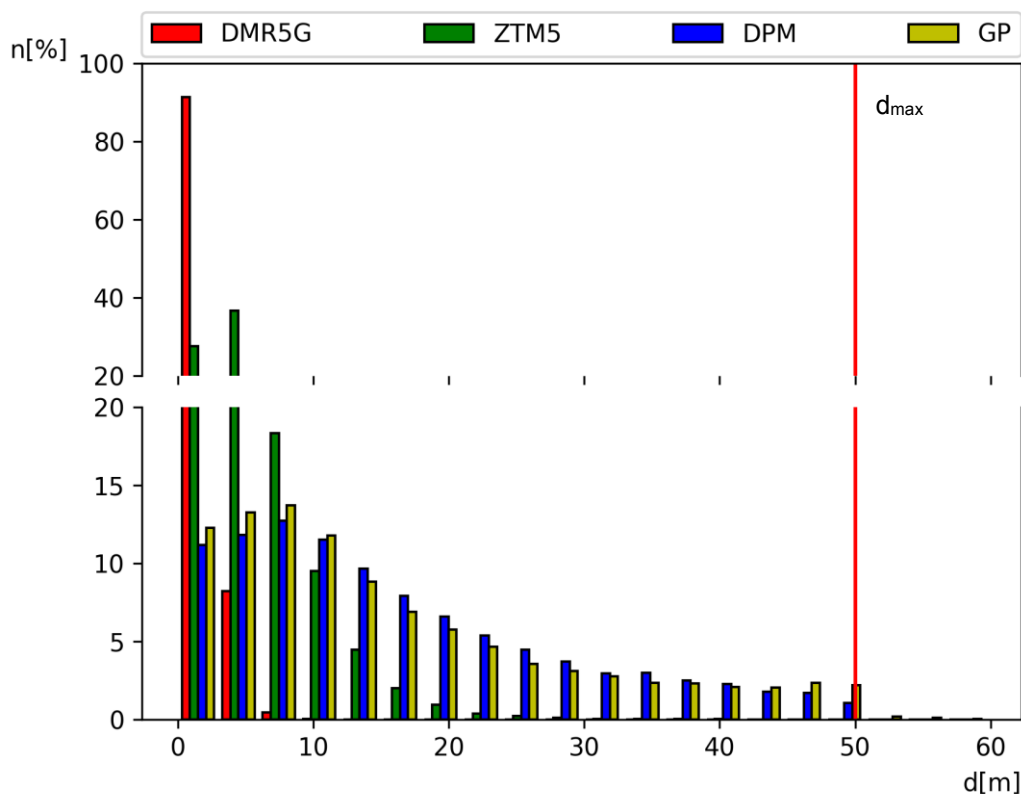
Délky segmentů jednotlivých vrstevnic jsou uvedeny v Tab. 6.25. U metody DPM došlo ke snížení počtu segmentů o téměř o 93 % a celková délka se snížila o více než 13 %.

U metody GP došlo ke snížení počtu segmentů o více než 93 % a celková délka se snížila téměř o 20 %.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
Počet segmentů	257050	54104	18676	17442
Celková délka [m]	342893,62	305763,27	296864,35	275143,70
$\bar{d}$ [m]	1,33	5,65	15,90	15,77
$\sigma$ [m]	1,13	4,19	12,10	13,00

Tab. 6.25: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2.

Histogram (viz Obr. 6.35) je podobný histogramu z předchozí kapitoly (viz Obr. 6.27). Obě generalizační metody opět tvoří vrstevnice s kratšími segmenty. Průměrná délka segmentu je menší než 16 m.



Obr. 6.35: Histogramy délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Mimoň 6-2.

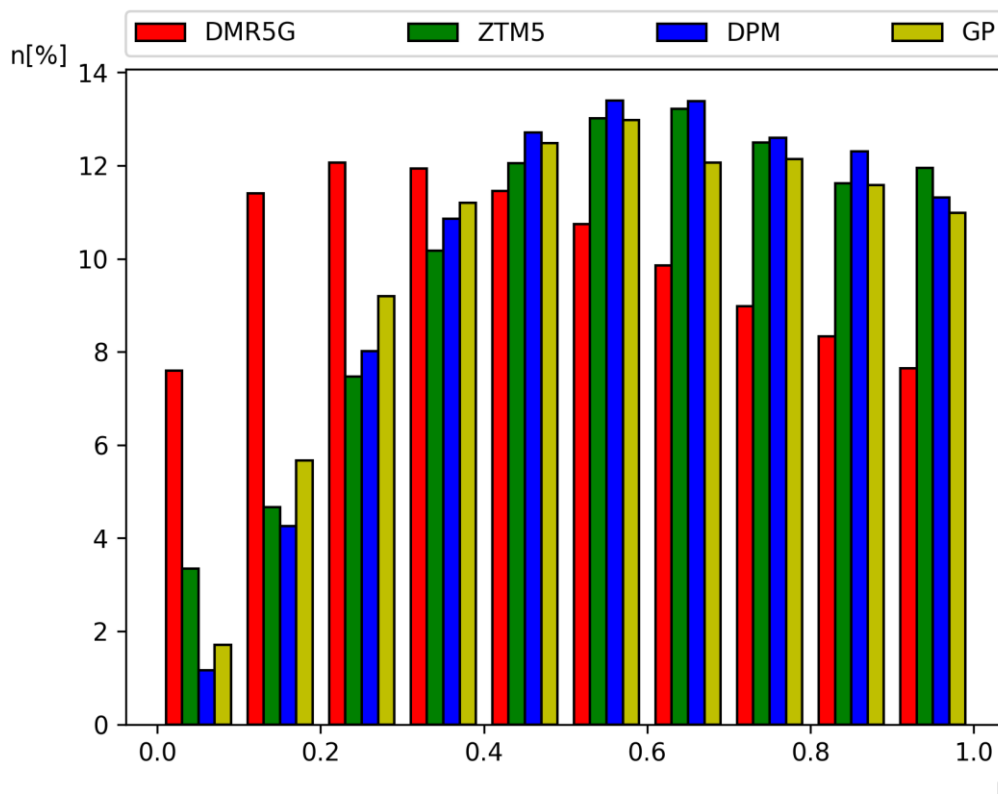
### Poměry délek sousedních segmentů

Ve srovnání s negeneralizovanými vrstevnicemi došlo u obou navržených metod ke zvýšení průměrné hodnoty  $r$  (viz Tab. 6.26). Výsledky jsou opět podobné výsledkům předchozí testovací lokality.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{r}$	0,4790	0,5819	0,5907	0,5729
$\sigma$	0,2705	0,2521	0,2376	0,2467

Tab. 6.26: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2.

Tuto vlastnost potvrzují i histogramy poměrů délek sousedních segmentů (viz Obr. 6.36). Opět je po aplikaci libovolné generalizační metody sníženo zastoupení sousedních segmentů s poměrem délek  $r < 0.4$  z 42 % na 24 % u metody DPM a u metody GP na 27 %. Vrstevnice ZTM5 jsou svojí distribucí poměrů  $r$  velmi podobné generalizačním metodám.



Obr. 6.36: Histogramy poměrů délek segmentů vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Mimoň 6-2.

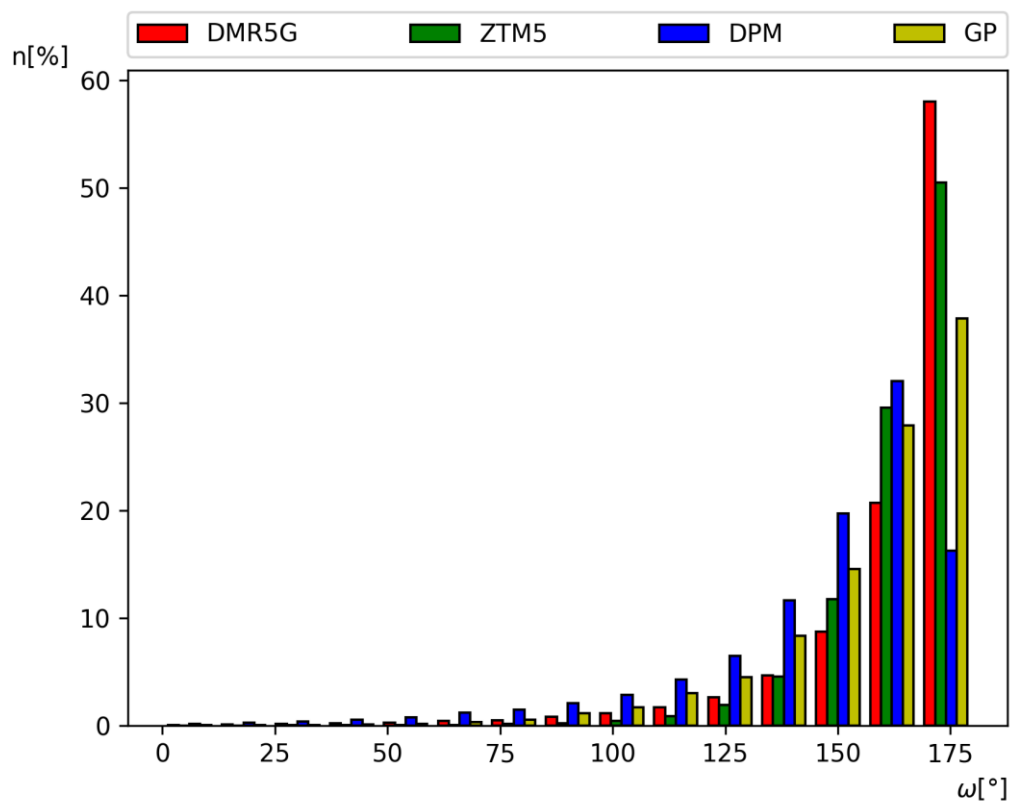
### Úhly mezi segmenty

Statistické ukazatele velikosti úhlů mezi sousedními segmenty jsou zobrazeny v tabulce 6.27.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{\omega}$ [°]	162,99	164,87	146,25	157,09
$\sigma$ [°]	21,84	14,90	27,88	21,14

Tab. 6.27: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2.

Histogram četnosti (viz Obr. 6.37) odpovídá histogramům prezentovaným v předchozích kapitolách. V testovacím území se vyskytují lokality s komplikovaným průběhem vrstevnic, jako jsou úseky meandrujícího toku nebo skalní útvary. Avšak většina území je tvořena kopci, kde je naopak průběh vrstevnic plynulý. Tím je způsobeno vytvoření velmi podobného histogramu s histogramy ostatních testovacích území.



Obr. 6.37: Histogramy úhlů mezi segmenty vrstevnic (vstupní i generalizované) pro oblast Mimoň 6-2.

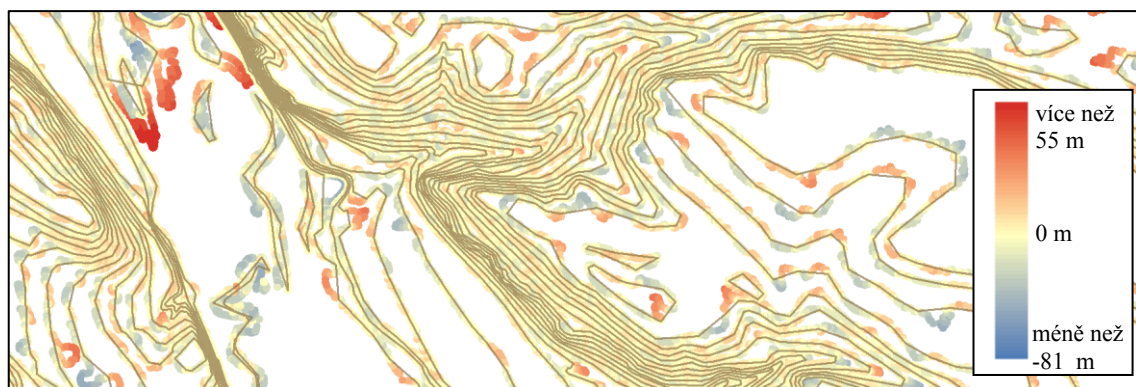
### Polohová chyba

Výsledky analýzy polohové chyby  $m_d$  jsou zobrazeny v tabulce 6.28.

	min [m]	max [m]	$\bar{m}_d$ [m]	$\sigma$ [m]
$m_d$	-102,89	82,77	0,01	7,22
$ m_d $	0	102,89	2,52	6,76

Tab. 6.28: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Mimoň 6-2.

Na obrázku 6.38 lze vidět, že testovací lokalita je kombinací území s vysokým sklonem, ale i velmi rovinatého území v místě koryta řeky. Vizualizace polohové chyby tedy odpovídá charakteru území, největší polohovou chybu můžeme nalézt v místě vodního toku, kde je široký buffer a poskytuje tak prostor pro větší míru generalizace. Naopak téměř nulová polohová chyba se nachází na přilehlých strmých kopcích, kde je nižší prostor pro generalizaci.



Obr. 6.38: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Mimoň 6-5.

### Výšková chyba

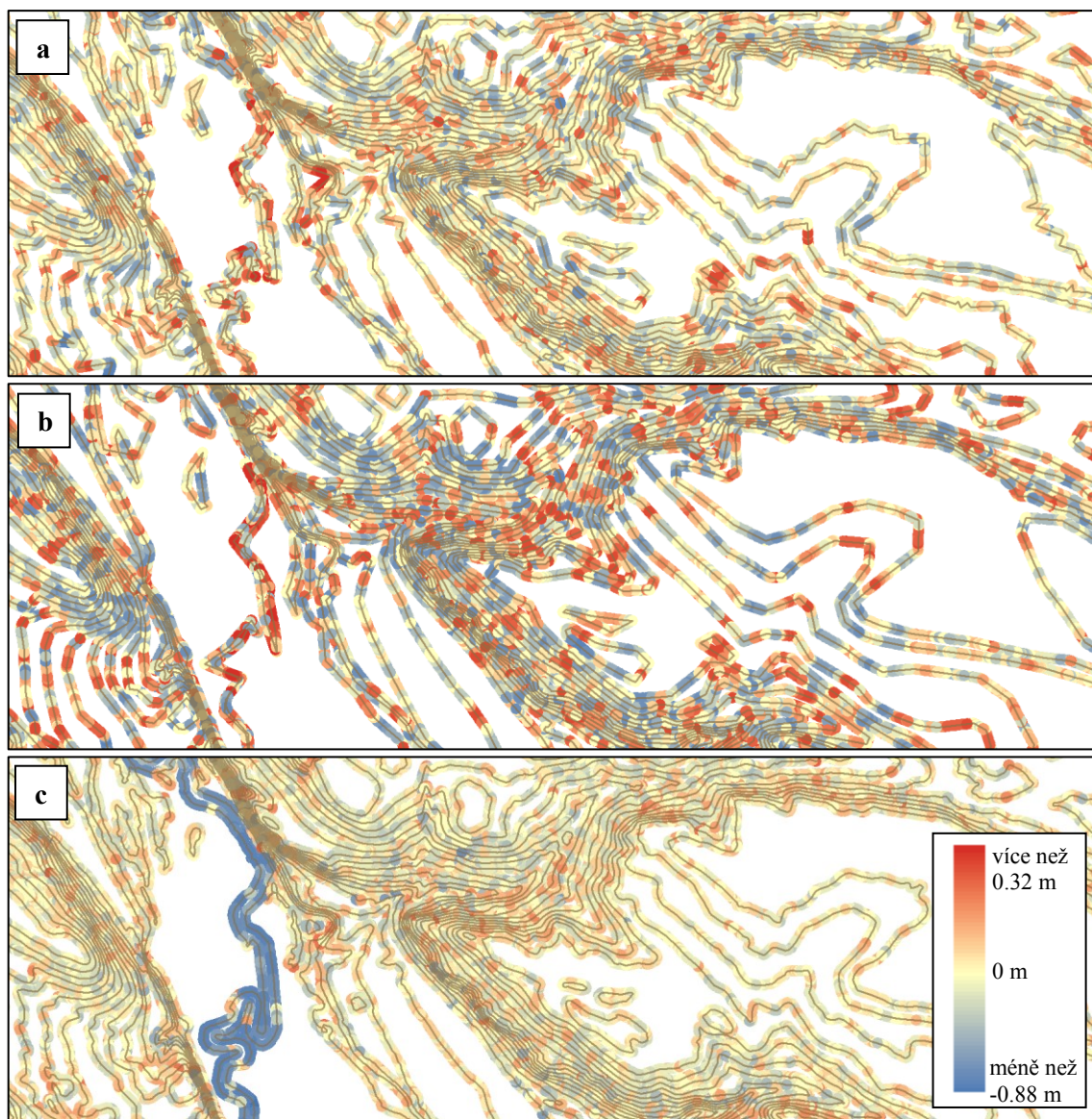
V tabulce 6.29 jsou zobrazeny hodnoty výškové chyby  $m_z$  pro jednotlivé vrstevnicové modely. U metody DPM je splněna maximální výšková chyba u 99,58 % testovaných průřezů, metoda GP dosahuje velmi podobného výsledku 99,59 %. V případě metody DPM je z celkových 232 562 testovaných průřezů 978 nevhodných, u metody GP bylo zjištěno 871 nevhodných průřezů z celkového počtu 214 171.

Metoda	min $\{m_z\}$ [m]	max $\{m_z\}$ [m]	$\bar{m}_z$ [m]	$\sigma$ [m]
DPM	-1,6613	0,6089	-0,0067	0,0838
DPM	0	1,6613	0,0573	0,0615
GP	-1,5577	0,6304	-0,0125	0,1259
GP	0	1,5577	0,0988	0,0790
ZTM5	-3,6605	5,8593	-0,0152	0,1371
ZTM5	0	5,8593	0,0663	0,1210

Tab. 6.29: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Mimoň 6-2.

Z výškových chyb u jednotlivých modelů (viz Obr 6.39) si lze všimnout extrémních minimálních hodnot -3,6 m až -1,0 m u vrstevnic ZTM5 v místě koryta řeky, které vznikly velmi rozdílným průběhem vrstevnice s využitím břehovek.





Obr. 6.39: Výšková chyba, mapový list Mimoň 6-2: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5

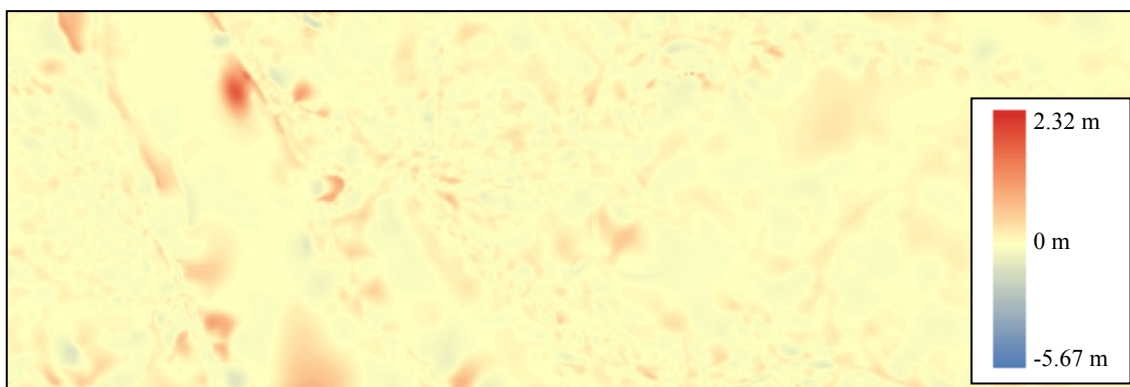
### Rozdíl DMT

Až na pár lokalit s extrémí (viz Obr. 6.40), rozdílový rastr vykazuje hodnoty diferencí blízké nule (viz Tab. 6.30). Patří mezi ně např. území, kde se tok zařezává do skály; zde mohou být interpolované hodnoty obou vytvořených digitálních modelů velmi rozdílné. Rozdíly také vznikají v oblastech mezi meandry řeky nebo v místech vrcholů lokálních vyvýšenin.

	min { $\Delta h$ } [m]	max { $\Delta h$ } [m]	$\bar{\Delta h}$ [m]	$\sigma$ [m]
$\Delta h$	-5,67	2,32	0,01	0,20

Tab. 6.30: Statistika rozdílového rastru pro oblast Mimoň 6-2.





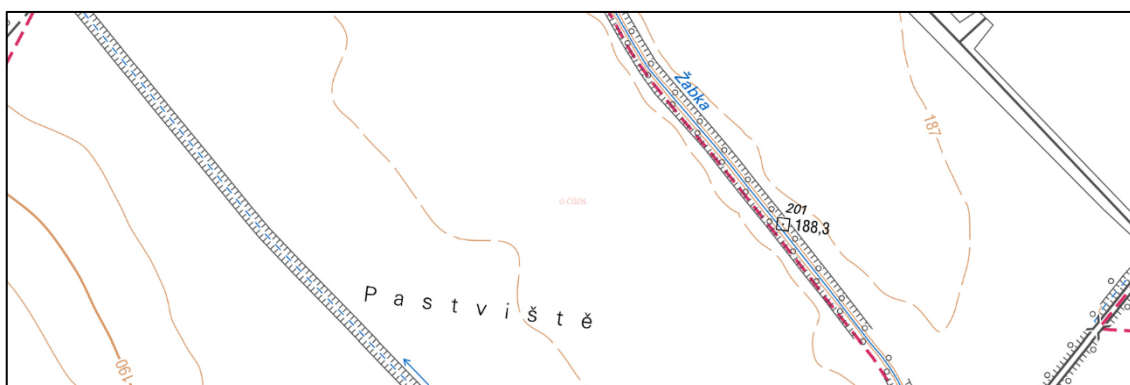
Obr. 6.40: Rozdílový rastr pro oblast Mimoň 6-2.

### 6.5.5 Nymburk 5-9

Poslední vybraná oblast se nachází u obce Kouty, v Polabí, kde je rovinatý reliéf s úzkými potoky protínající pole. Kombinace rovin a uměle upravených koryt vytváří komplikovaný reliéf pro zobrazení vrstevnicemi. Vstupní vrstevnice z DMR5G budou obsahovat řadu nevhodných malých uzavřených vrstevnic, často se budou vyskytovat nežádoucí oscilace. Šířka výškových bufferů bude v rovinatých územích značná (v řádech desítek metrů) a bude tak docházet k významnější generalizaci. Naopak v místech uměle upravených koryt budou výškové buffery úzké a bude realizována minimální, až nulová, generalizace. Základní charakteristika je zobrazena v tabulce 6.31. Náhled je zobrazen na obrázku 6.41.

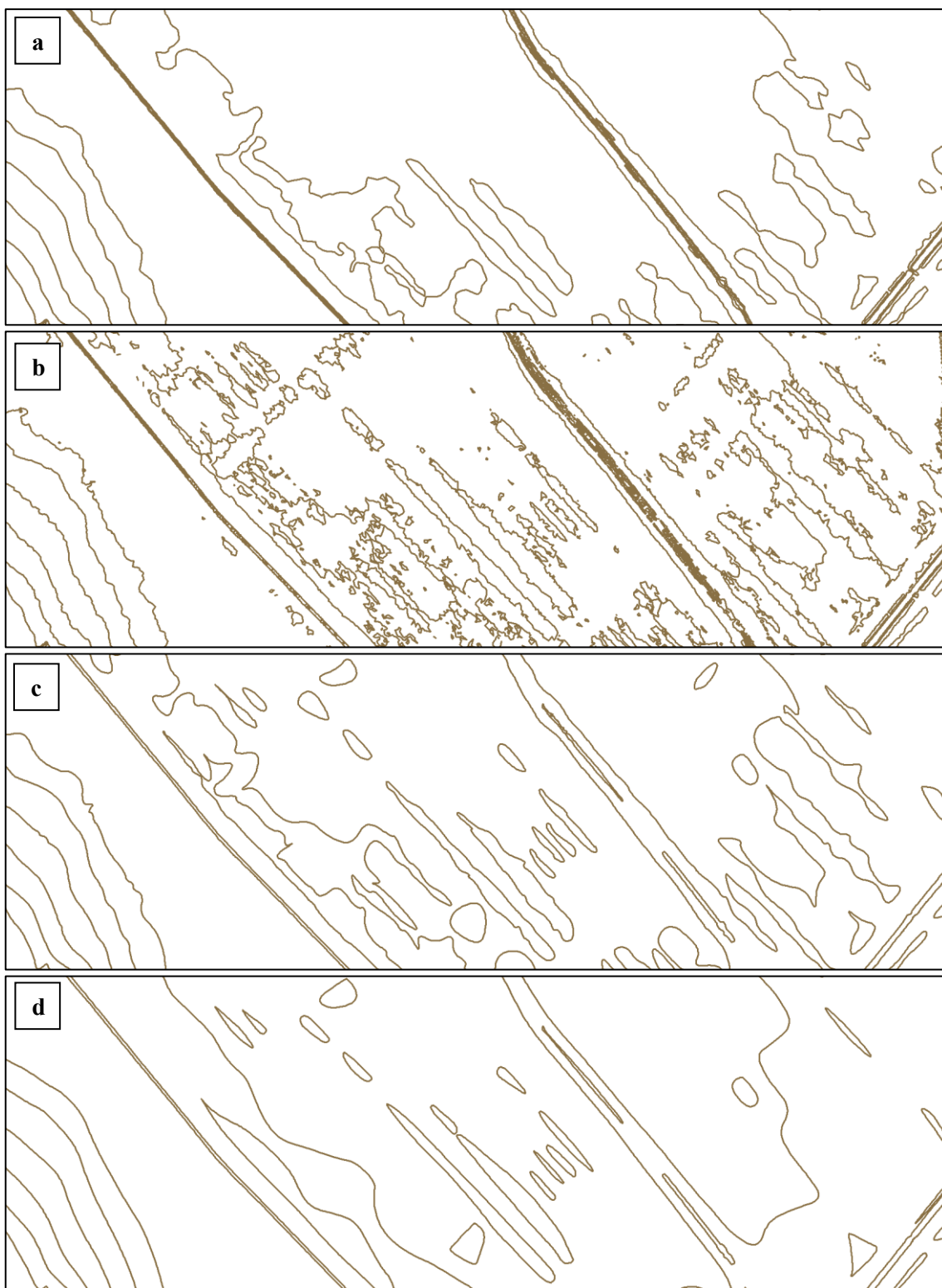
	$\bar{x}$	$\sigma$	min	max
Nadmořská výška [m]	188.10	1.85	184.76	195.18
Sklon [°]	1.89	4.70	-	-

Tab. 6.31: Základní charakteristika území Nymburk 5-9.



Obr. 6.41: Náhled na testovací oblast Nymburk 5-9.

Referenční vrstevnice mapového díla ZTM5 jsou zobrazeny na obrázku 6.42a a vrstevnice vytvořené lineární interpolací z bodového mračka DMR5G jsou zobrazeny na obrázku 6.42b. Vrstevnice generalizované metodou DPM jsou zobrazeny na obrázku 6.42c a vrstevnice generalizované metodou GP jsou zobrazeny na obrázku 6.42d.



Obr. 6.42: Vrstevnice, mapový list Nymburk 5-9 se základním intervalem 1m: a) referenční ZTM5, b) vytvořené lineární interpolací, c) vytvořené metodou DPM, d) vytvořené metodou GP.

### Délky segmentů

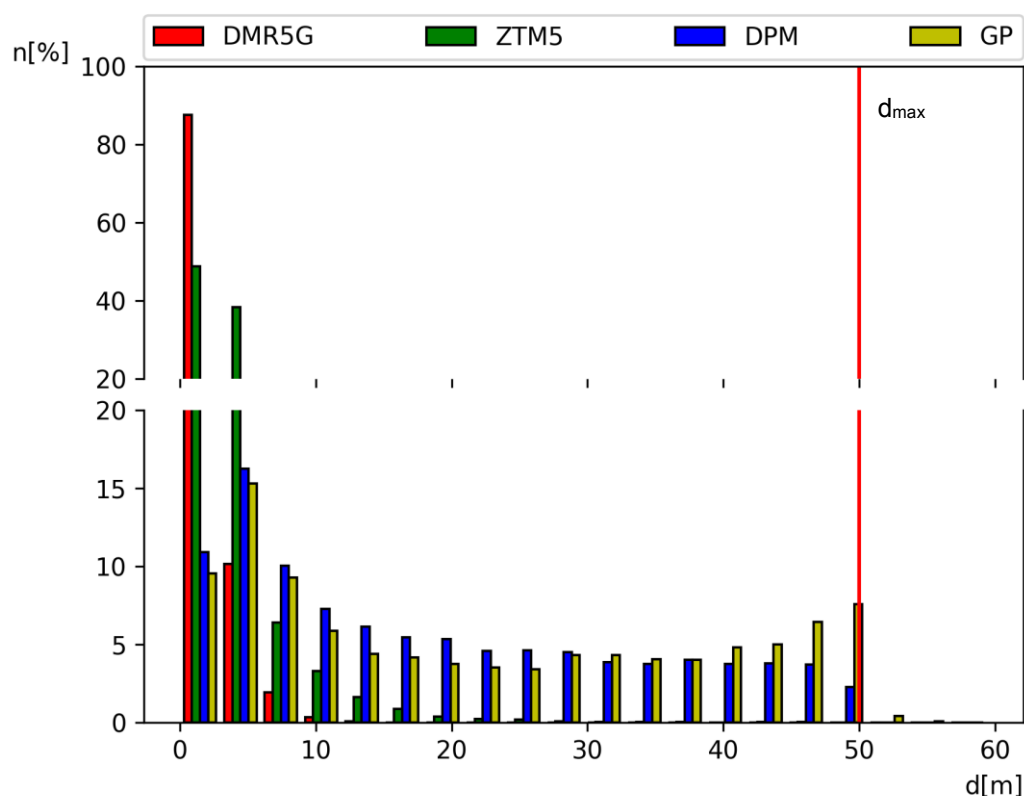
Výsledky analýzy délek segmentů jsou zobrazeny v tabulce 6.32. U metody DPM došlo ke snížení počtu segmentů o více než 95 % a celková délka se snížila téměř o 40 %. U metody GP došlo ke snížení počtu segmentů téměř o 97 % a celková délka se snížila

o více než 50 %. Velké snížení celkové délky segmentů je zapříčiněno eliminací mnoha krátkých a malých uzavřených vrstevnic.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
Počet segmentů	139644	35155	6550	4518
Celková délka [m]	201272,28	132613,91	120914,66	100064,78
$\bar{d}$ [m]	1,44	3,77	18,46	22,15
$\sigma$ [m]	1,52	3,41	14,41	16,57

Tab. 6.32: Délky segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.

Histogram distribuce délek jednotlivých vrstevnicových modelů je zobrazen na obrázku 6.43. Poměrně vysoký počet délek segmentů odpovídající 50 m u metody GP, je způsoben generalizací rovných dlouhých vrstevnic podél umělého koryta řeky. Takové vrstevnice jsou tvořeny větším množstvím segmentů odpovídající délkou hodnotě  $d_{max}=50$  m.



Obr. 6.43: Histogramy délek segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.

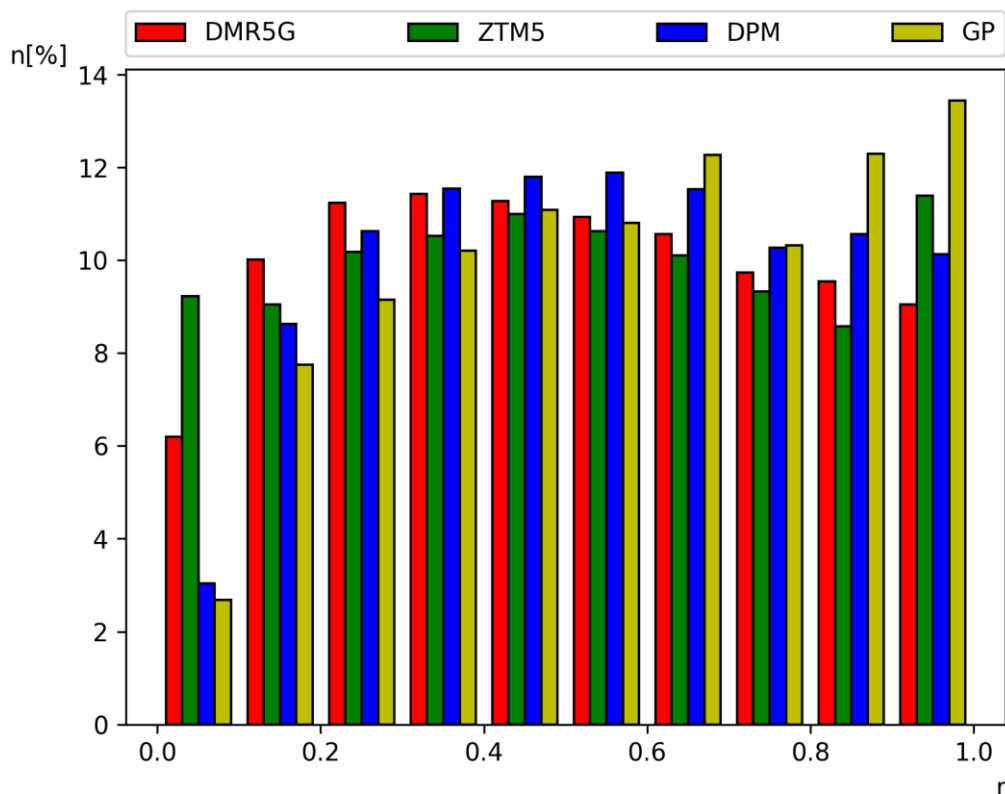
### Poměry délek sousedních segmentů

Výsledky analýzy poměrů délek sousedních segmentů jsou zobrazeny v tabulce 6.33, kde je patrné, že metoda úhlového potenciálu vytváří velké množství podobných segmentů.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{r}$	0,5069	0,5070	0,5387	0,5722
$\sigma$	0,2709	0,2880	0,2593	0,2656

Tab. 6.33: Poměry délek segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.

Z vytvořených histogramů (viz Obr. 6.44) poměrů délek sousedních segmentů je patrný nárůst segmentů s podobnou délkou u metody GP. Tento nárůst je nejspíše způsoben dvěma faktory. Prvním faktorem je eliminace nevhodných uzavřených vrstevnic ze vstupních vrstevnic, druhým pak je specifický charakter území s umělými koryty úzkých vodních toků.



Obr. 6.44: Histogramy poměrů délek segmentů vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.

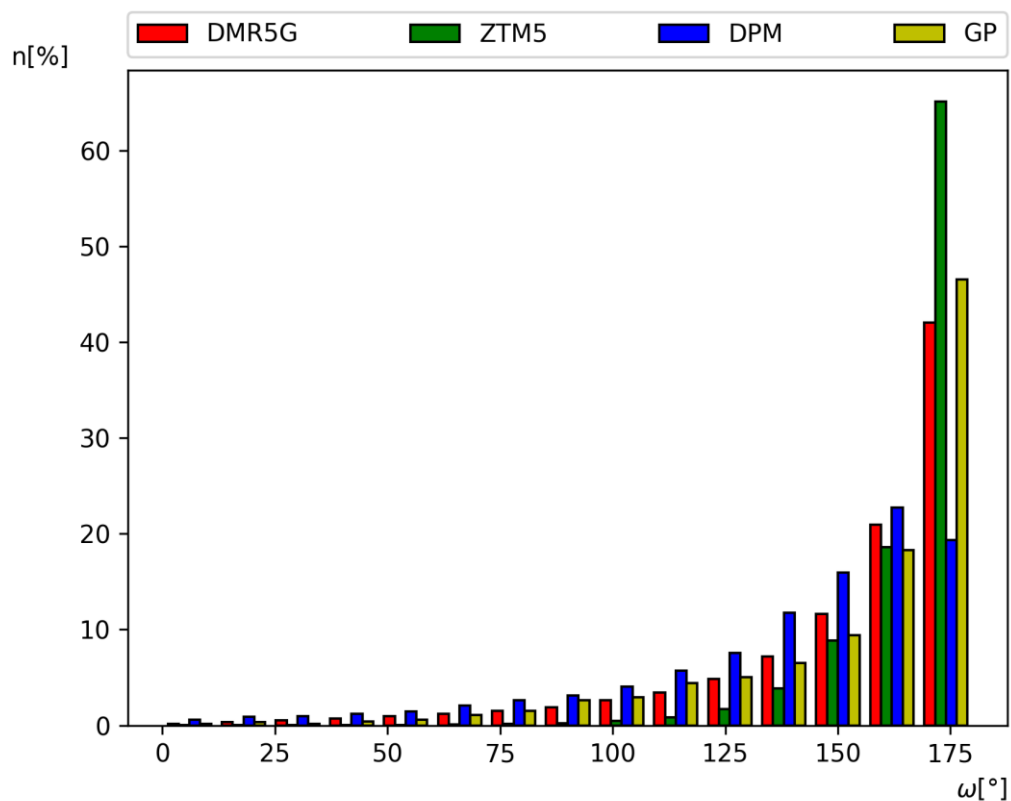
### Úhly mezi segmenty

Výsledky analýzy úhlů mezi sousedními segmenty, jsou zobrazeny v tabulce 6.34. Jako v případě ostatních testovacích oblastí, vytváří metoda DPM 48,6 % sousedních segmentů, které svírají nevhodný úhel menší než  $150^\circ$ . Metoda GP takových to segmentů vytváří pouze 29,8 %.

	Vrstevnice			
	DMR5G	ZTM5	DPM	GP
$\bar{\omega} [^\circ]$	152,41	168,43	138,88	154,02
$\sigma [^\circ]$	31,63	16,08	36,33	30,90

Tab. 6.34: Úhly mezi segmenty vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.

Histogramy jsou zobrazeny na obrázku 6.45.



Obr. 6.45: Histogramy úhlů mezi segmenty vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.

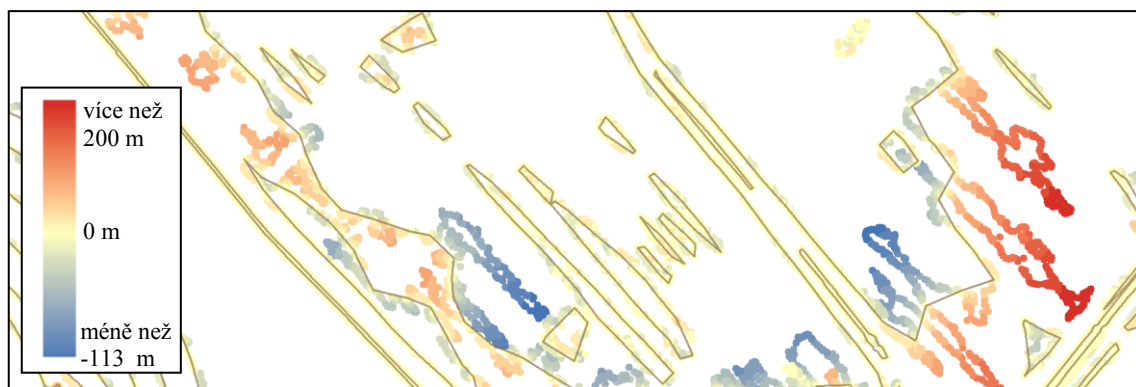
### Polohová chyba

Výsledky analýzy polohové chyby  $m_d$  jsou zobrazeny v tabulce 6.35. Získané hodnoty odpovídají charakteru území, ve kterém může díky širokým výškovým bufferům docházet k velké míře generalizace.

	min [m]	max [m]	$\bar{m}_d$ [m]	$\sigma$ [m]
$m_d$	-168,65	259,93	1,52	22,04
$ m_d $	0	259,93	6,93	20,98

Tab. 6.35: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Nymburk 5-9.

Na obrázku 6.46 je vizualizována polohová chyba, která díky širokým výškovým bufferům nabývá značné hodnoty až téměř 260 m. Můžeme si všimnout, že generalizační metoda odstranila velké oscilace v pravé části testovacího území a zároveň správně zachovala dlouhé úzké vrstevnice lemující uměle vytvořený vodní tok.



Obr. 6.46: Polohová chyba generalizovaných vrstevnic metodou úhlového potenciálu pro oblast Nymburk 5-9.

### Výšková chyba

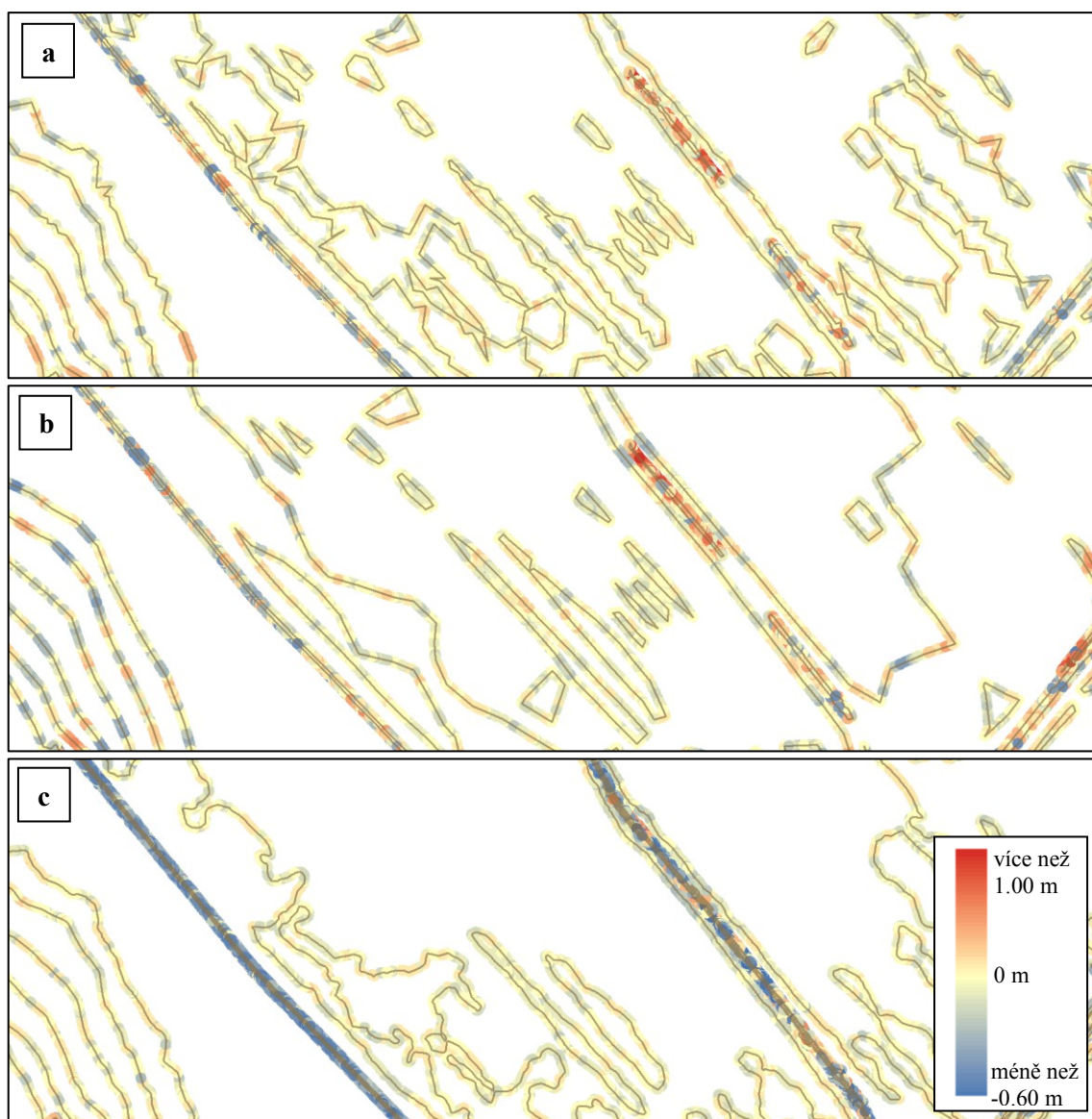
V tabulce 6.36 jsou zobrazeny hodnoty výškové chyby  $m_z$  pro jednotlivé vrstevnicové modely. U metody DPM je splněna maximální výšková chyba u 98,01 % testovaných průřezů, metoda GP dosahuje podobného výsledku 96,68 %. V případě metody DPM je z celkových 88 050 testovaných průřezů 1756 nevhodných, u metody GP bylo zjištěno 2462 nevhodných průřezů z celkového počtu 74 210.

Metoda	min $\{m_z\}$ [m]	max $\{m_z\}$ [m]	$\bar{m}_z$ [m]	$\sigma$ [m]
DPM	-1,2471	1,7300	0,0059	0,1042
DPM	0	1,7300	0,0566	0,0877
GP	-1,0378	1,5757	0,0084	0,1354
GP	0	1,5757	0,0832	0,1071
ZTM5	-2,7827	0,8053	-0,0831	0,2096
ZTM5	0	2,7827	0,1207	0,1904

Tab. 6.36: Výšková chyba vrstevnic pro oblast Nymburk 5-9.

Dle očekávání se největší výšková chyba vyskytuje v místech umělých koryt a násypů cest, v závislosti na metodě činí až 2,78 m. Na obrázku 6.47 je taky možné, že odstranění velkých oscilací u vstupních vrstevnic v rovinném území téměř neovlivňuje velikost výškové chyby.





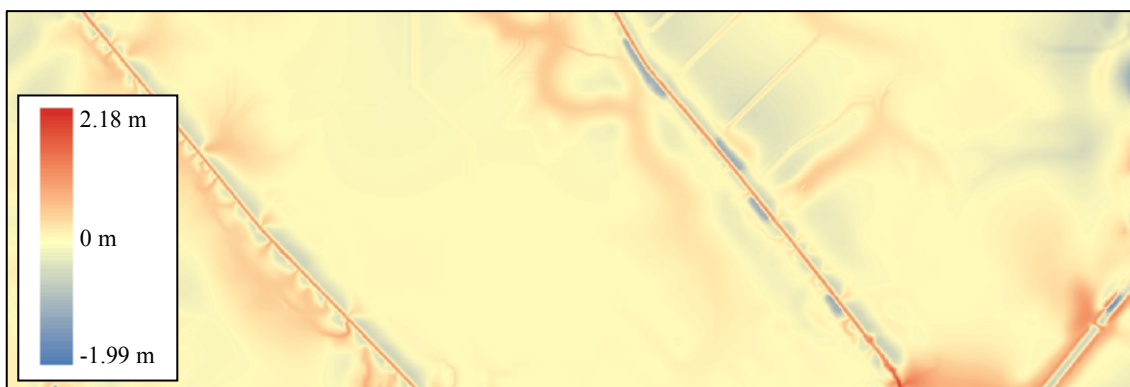
Obr. 6.47: Výšková chyba, mapový list Nymburk 5-9: a) metoda DPM, b) metoda GP, c) vrstevnice ZTM5

### Rozdíl DMT

Z rozdílového rastru (viz Obr. 6.48) je patrné, že generalizované vrstevnice vytvořené ze vstupních vrstevnic vygenerovaných z DMR5G dosahují vyšších odchylek v místě koryt potoků, které jsou v případě vrstevnic ZTM5 jasně a přesně definovány. Vzhledem k faktu, že jsou koryta zarostlá hustou vegetací, je otázkou, zda se podařilo vliv vegetace zcela odstranit filtrací vstupního bodového mračna. Statistické ukazatele jsou zobrazeny v tabulce 6.37.

	$\min \{\Delta h\}$ [m]	$\max \{\Delta h\}$ [m]	$\overline{\Delta h}$ [m]	$\sigma$ [m]
$\Delta h$	-1,99	2,18	0,02	0,23

Tab. 6.37: Statistika rozdílového rastru pro oblast Mimoň 6-2.



Obr. 6.48: Rozdílový rastr pro oblast Mimoň 6-2.

## 6.6 Shrnutí dosažených výsledků

Zhodnocení výsledků navržených metod je provedeno s ohledem na pravidla definovaná v kapitolách 3.2, 3.3 popisující vlastnosti vrstevnic. Protože oba navržené postupy generují rozdílné výsledky a mohou tak být vhodné pro různé účely, tato diskuze výsledků může pomoci k výběru vhodnější metody z pohledu potřeb případného uživatele.

### P1: Konstantní nadmořská výška

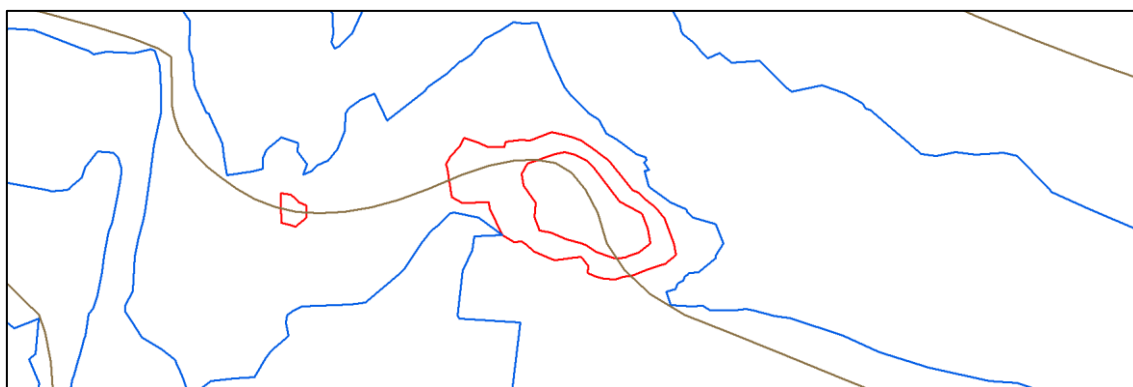
V práci bylo toto pravidlo testováno s ohledem na dodržení maximální výškové chyby  $m_z$ , která odpovídala zvolené šířce výškového bufferu  $dz=0,25\text{ m}$ . V Tab. 6.38 jsou sumarizovány výsledky provedené validace pro jednotlivá testovací území. Výsledky ukazují počet testovacích bodů splňující kritérium maximální výškové chyby.

Metoda	Dubá	Hradec Králové	Litoměřice	Mimoň	Nymburk	$\bar{n}$ [%]
DPM n { $m_z$ } [%]	97,91	98,23	99,73	99,58	98,01	<b>98,69</b>
GP n { $m_z$ } [%]	98,02	98,32	99,83	99,59	96,68	<b>98,49</b>

Tab. 6.38: Množství bodů splňující výškovou chybu  $m_z$ .

Body, které nesplňují kritérium maximální výškové chyby, jsou důsledkem předzpracování vrstevnic a výškového bufferu, viz kap. 5.2. Při odstranění malých částí výškového bufferu, které ohraničovaly lokální vyvýšeninu nebo sníženinu, došlo k umožnění průběhu generalizace i přes takovou oblast (viz Obr. 6.49). Takové segmenty vrstevnic nesplňují požadavek maximální výškové chyby, ve většině případů tato porušení můžeme vnímat jako málo významná.

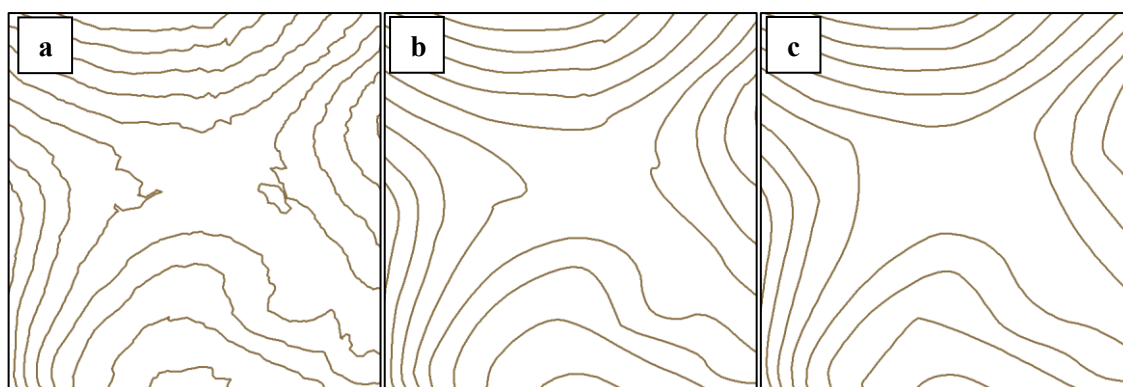




Obr. 6.49: Průběh vrstevnice (hnědá) zatížené výškovou chybou  $m_z$  v důsledku předzpracování výškového bufferu (modře – výškový buffer, červeně – eliminované části).

## P2: Hladkost a spojitost

Hladkost a spojitost by měly být základní grafické vlastnosti vrstevnice zobrazující klasický přírodní reliéf, např. kopec, úpatí nebo údolí. V případě antropogenních tvarů takové pravidlo často nemůže být dodrženo (ostré zlomy na hranách objektů). Ukázka vytvoření vrstevnic v místě sedla je znázorněna na Obr. 6.50. Průběh generalizované vrstevnice vytvořené metodou DPM naznačuje, že vytváří méně hladké vrstevnice, nedochází k potlačení lokálních oscilací u vstupních vrstevnic jako u metody GP. Z obrázku je však patrné, že první metoda tedy lépe zachovala tvar sedla.



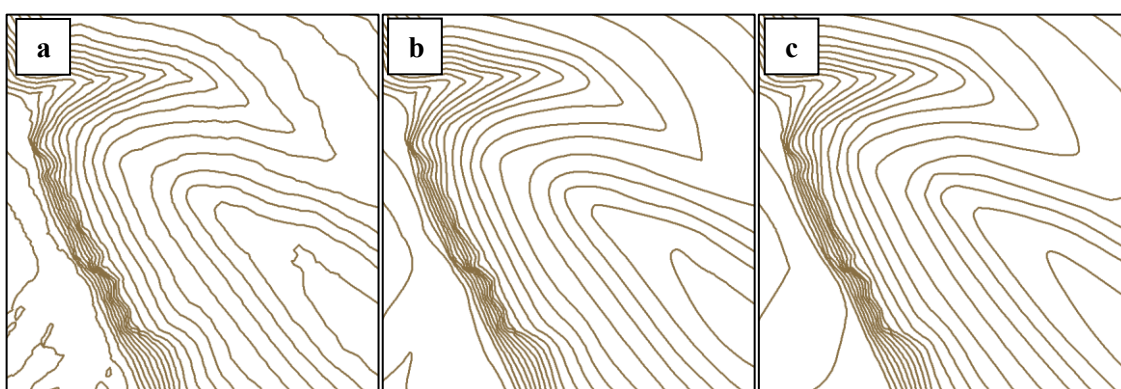
Obr. 6.50: Vrstevnice v místě sedla, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP.

V další ukázce (viz Obr. 6.51) je zobrazen detail vrstevnice v údolí tvořící terénní vlny. Lze si všimnout, že metoda DPM v některých místech vstupní vrstevnici téměř negeneralizovala a je tím velmi narušena hladkost vrstevnice. Metoda GP odstraňuje oscilace, které se nachází u vstupních vrstevnic. V tomto případě dosáhla lepšího výsledku metoda druhá.



Obr. 6.51: Vrstevnice v místě terénní vlny, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP

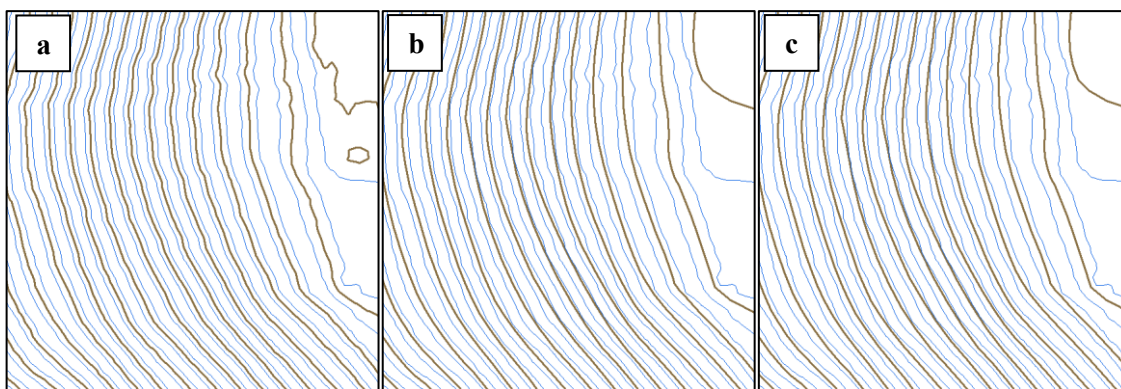
Na Obr. 6.52 je zobrazen svahový břeh v blízkosti meandrujícího toku. U obou metod je patrné vytváření více ostrých lomů mezi segmenty, z kartografického pohledu je výstup over-simplified. V tomto případě nelze rozhodnout, která z metod je lepší. V oblastech s velkým sklonem se tedy hodnota bufferu  $k=0.25$  může jevit jako příliš velká, dochází k nežádoucímu potlačení detailů. Tomuto nevhodnému chování bychom se mohli vyhnout snížením hodnoty  $k$ .



Obr. 6.52: Vrstevnice v místě svahového břehu, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP.

#### P4: Stejný rozestup sousedních vrstevnic

Toto pravidlo může být hodnoceno pouze v oblastech s vyšším a konstantním sklonem. Obě navržené metody vytvářejí generalizované vrstevnice, které se snaží nacházet uvnitř výškového bufferu, ale zároveň docílit největší možné míry generalizace. Tato charakteristika, posílená vyhlazením metodou corner cutting způsobuje, že vrstevnice v místech oblouků procházejí velmi blízko segmentu výškového bufferu, dochází tedy k posunu vrstevnice a ke zkracování či ořezávání výběžků vrstevnice. Stejný rozestup je sice dodržen, vrstevnice v místech změny směru inklinují k hornímu nebo dolnímu segmentu výškového bufferu (viz Obr. 6.53). Generalizovaná vrstevnice se tedy přibližuje k vnitřní straně oblouku. V tomto případě je tedy chování obou metod podobné.



Obr. 6.53: Rozestup vrstevnic, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP.

### P5: Topologická korektnost vrstevnic

Snahou práce bylo vytvořit metody, které budou vytvářet topologicky konkrétní, avšak bez komplikovanějších testovacích pravidel není možné zamezit vzniku chyb. U některých úseků generalizované vrstevnice tak nastává k vytváření self-intersections. Tato chyba nastává u metody DPM (viz Obr. 6.54). Další topologickou chybou, která může nastat, je protnutí dvou rozdílných vrstevnic. Tento problém nastává hlavně v oblastech vodních toků, kde se nachází mnoho menších uzavřených vrstevnic uvnitř širokého výškového bufferu, které se mohou po generalizaci vzájemně křížit. Tento problém naopak vzniká častěji u metody GP (viz Obr. 6.55), je však také důsledkem absence břehovek při tvorbě vstupních vrstevnic. Digitální model terénu v místech břehu nepřirozeně osciluje, což ovlivňuje i odvozené vrstevnice. Jako lepší metoda se jeví metoda GP, která vytváří self-intersections výjimečně a pokud by vstupní vrstevnice správně korespondovaly s vodním tokem, došlo by k odstranění situací křížení vrstevnic.



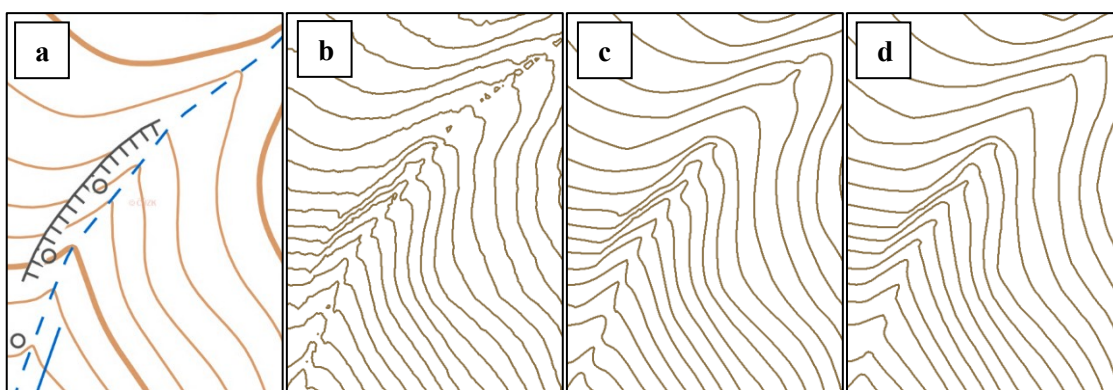
Obr. 6.54: Vrstevnice se self-intersections, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM.



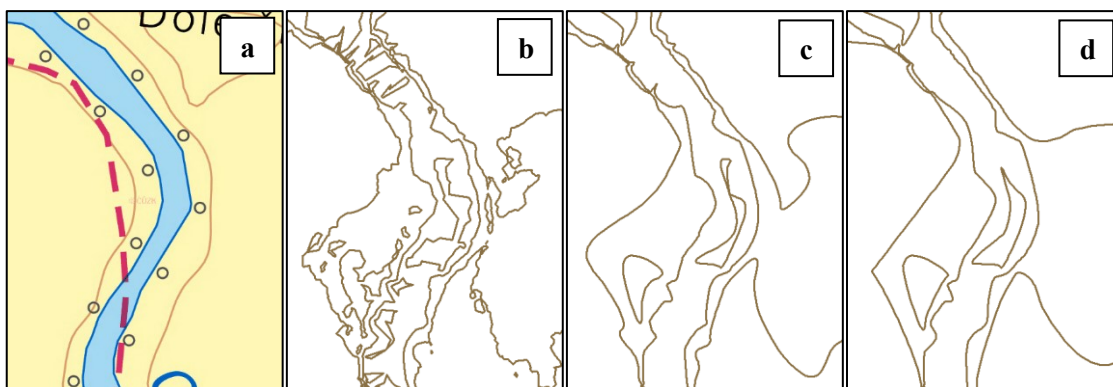
Obr. 6.55: Protínající se vrstevnice, a) vytvořené lineární interpolací, b) generalizované metodou DPM, c) generalizované metodou GP.

### P6: Korespondence s ostatními prvky v mapě

Nejčastějším prvkem mapy, se kterým vrstevnice musí korespondovat, představuje vodstvo. V ideálním případě je vhodné průběh vodních toků i vodních ploch zahrnout při vytváření hydrologicky korektního digitálního modelu terénu, ze kterého jsou interpolovány vstupní vrstevnice, a následně generalizované vrstevnice. Tento krok v práci nebyl realizován, povinné hrany pro vodstvo nebyly v okamžiku tvorby diplomové práce ještě k dispozici, a proto může docházet k potlačení typických terénních tvarů vytvářených právě v okolí vodních toků. Oba prvky tedy spolu nemusí následně korespondovat. Navržené metody částečně dodržují průběh vstupní vrstevnice v místech se strmějším spádem (viz Obr. 6.56), naopak v oblasti rovin a meandrů výsledky neodpovídají realitě; je vytvářeno mnoho malých uzavřených vrstevnic (viz Obr. 6.57). Jak již bylo uvedeno výše, jedná se zejména o důsledek absence břehovek. V tomto případě nebudeme tedy obě metody hodnotit.



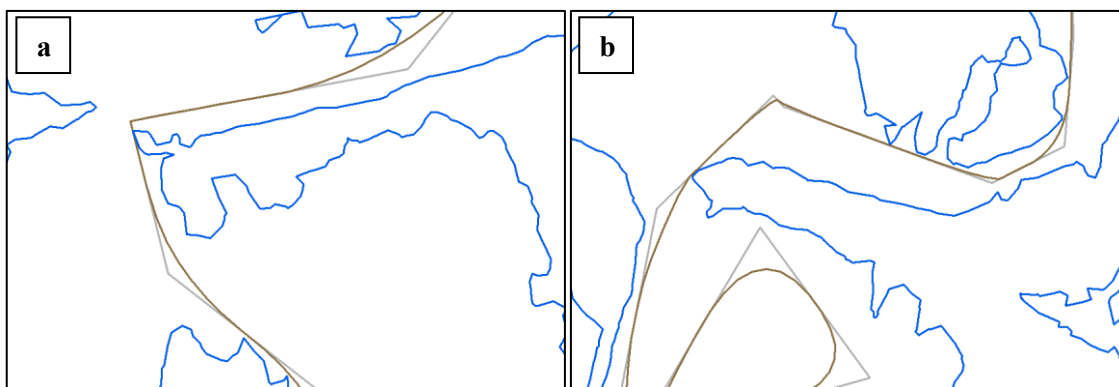
Obr. 6.56: Vrstevnice u vodního toku, a) ukázka ZM10, b) vytvořené lineární interpolací, c) generalizované metodou DPM, d) generalizované metodou GP.



Obr. 6.57: Vrstevnice u meandru, a) ukázka ZM10, b) vytvořené lineární interpolací, c) generalizované metodou DPM, d) generalizované metodou GP.

### G1: Zachování křivosti vrstevnic

Metody se snaží zachovávat křivost generalizovaných vrstevnic aplikováním vyhlazovacího algoritmu. Při něm je mezi dvojicí segmentů vložen nový, dochází tak ke vzniku kratších segmentů svírající úhel blízký se  $180^\circ$ . V důsledku modifikace vyhlazovacího algoritmu, která zamezuje vyhlazené vrstevnici protnout výškový buffer (viz Obr. 6.58), nemůže být křivost zachována po celé délce vrstevnice. K podobnému efektu dochází v důsledku neodstranění krátkých segmentů během postprocessingu již generalizovaných vrstevnic, a to opět z důvodu, že by vrstevnice protínala výškový buffer. Na vrstevnicích se tedy občas objevují místa, kde se segmenty protínají pod ostrými úhly. Typické je to v oblastech, kde je průběh výškového bufferu různorodý s výběžky a oscilacemi. Jedná se o chybu, která je vzhledem k povaze metody neodstranitelná.



Obr. 6.58: Chyby zachování křivosti (šedě - generalizovaná vrstevnice, hnědě - vyhlazená vrstevnice), a) z důvodu vyhlazení, b) z důvodu postprocessingu.

### Závěrečné shrnutí

1. Z předchozích výstupů je patrné, že navržené metody jsou vhodné jak pro území rovinatá, mírně skloněná, ale i svažité.

2. Výsledné generalizované vrstevnice mají podobnou křivost, splňují, byť s některými výhradami, výše uvedené kartografické požadavky.
3. Snaha o zachování výškové odchylky generuje v rovinatých místech větší polohové odchylky, může docházet i k topologickým chybám, ke kterým je náchylnější zejména metoda DPM.
4. Zatímco metoda GP generuje hladší vrstevnice s podobnými délkami sousedních segmentů, metoda DPM více zohledňuje tvar původní vrstevnice, častěji se střídají delší a kratší segmenty.
5. Výsledky poskytované metodou GP se více přibližují výstupům vytvořeným kartografem.
6. Nevýhodu obou metod představuje posun segmentů vrstevnic směrem ke středu oblouků.

## 7 Závěr

Diplomová práce se zabývala kartografickou generalizací vrstevnic vytvořených z bodových množin s vysokou prostorovou hustotou (letecké laserové skenování) vhodnou k využití v topografických mapách velkých měřítek. Hlavním cílem bylo navrhnout metodu generalizace, která bude zachovávat maximální povolenou výškovou chybu, a bude poskytovat výstupy splňující kartografické i geometrické požadavky.

V práci byly představeny tři možné metody pro generalizaci vrstevnic. Všechny metody využívají pro dodržení maximální výškové chyby pomocnou strukturu, tzv. výškový buffer. První metoda využívající vážené průměrování trojúhelníku vytvořeného z vrcholů vrstevnice a jejich nejbližších bodů na výškovém bufferu nepřináší vhodné výsledky, pro možné využití v kartografii by bylo nutné metodu modifikovat. Druhá představená metoda vychází ze známého a hojně využívaného Douglas-Peuckerova algoritmu. Vlastní návrh modifikuje tento algoritmus nahrazením klasického koridoru o konstantní šířce výškovým bufferem s proměnnou šířkou. Jak se ukázalo, metoda zachovává tvar vrstevnice, často však dochází k nepřirozeným lomům mezi sousedními segmenty. Poslední a nejvíce perspektivní metoda využívá generalizační potenciál počítaný na základě umístění generalizovaného segmentu a výškového bufferu. V práci bylo navrženo několik metod výpočtu potenciálu, jako nejvhodnější se jevila metoda založená na úhlu svíraným sousedními segmenty. Vlastní generalizační algoritmus prováděl nahrazování trojice vrcholů dvojicí, přeskakoval bod s největší hodnotou potenciálu. Postupovalo se tedy od segmentů, které svíraly nejostřejší úhly. Tato metoda lépe zachovávala křivost, hůře tvar, celkově však překonávala modifikovaný DP algoritmus. Obě metody obsahují vstupní parametry, které ovlivňují výslednou míru generalizace.

Na základě rozsáhlého testování zahrnující srovnání kvalitativních i kvantitativních parametrů generalizace (analýzy délek segmentů, poměrů délek sousedních segmentů, úhly mezi sousedními segmenty, polohová a výšková chyba), jejich vizualizace a srovnání s vrstevnicemi poskytnutými Zeměměřičským úřadem vytvořenými kartografem-profesionálem se navržené metody generalizace jeví jako perspektivní.

Potenciál pro další vylepšení metody lze hledat v souvislosti s pravidly P4 a G1, která na některých místech nemohla být dodržena. Výsledné vrstevnice v místech zakřivení zachovávají vzájemnou vzdálenost, avšak dochází k systematickému posunu.

Podobně nebylo možné vždy zachovat hladkost vrstevnice. Oba nedostatky jsou důsledkem faktu vyplývajícím z metody generalizačního potenciálu, při kterém se generalizovaná vrstevnice příliš přibližuje vnitřní straně oblouku. Další problém představují místa s širokým výškovým bufferem či místa, kde neexistuje horní nebo dolní komponenta bufferu.

V mnoha směrech je zde tedy prostor pro zdokonalení této metody. Navržené metody neřeší korespondenci vrstevnic s dalšími prvky v mapě, jako jsou vodní toky, vodní plochy nebo antropogenní tvary. Další možnost vylepšení poskytuje výběr jiných vyhlazovacích algoritmů výsledné vrstevnice.

Na závěr lze konstatovat, že cíl diplomové práce byl splněn. Bylo navrženo více metod pro generalizaci vrstevnic, provedena jejich implementace v jazyce Python a rozsáhlé testování, metoda úhlového potenciálu poskytovala nejvíce uspokojivé výsledky.



## Seznam literatury

- ALEXA, M., BEHR, J., COHEN-OR, D., FLEISHMAN, S., LEVIN, D., SILVA, C. T. (2003): Computing and rendering point set surfaces. *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*, 9, č. 1, s. 3 – 15.
- BALL, A. A. (1974): CONSURF. Part one: introduction of the conic lofting tile. *Computer-Aided Design*, 8, č. 25, s. 513 – 520.
- BENTLEY, J. L., OTTMANN, T. A. (1979): Algorithms for reporting and counting geometric intersections. *IEEE Transactions on computers*, 9, č. 28, s. 643 – 647.
- BERTOLOTTO, M., ZHOU, M. (2007): Efficient and consistent line simplification for web mapping. *International Journal of Web Engineering and Technology*, 3, č. 2, s. 139 – 156.
- BRÁZDIL, K. (2012): Technická zpráva k Digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G). Zeměměřický úřad, Pardubice.
- CATMULL, E., ROM, R. (1974): A class of local interpolating splines. *Computer Aided Geometric Design*, s. 317–326.
- CETINKAYA, B. a kol. (2006). Contour Simplification with Defined Spatial Accuracy. *Workshop of the ICA Commission on Map Generalisation and Multiple Representation*, 7 s.
- CIGNONI, P., MONTANI, C., SCOPIGNO, R. (1998): A comparison of mesh simplification algorithms. *Computers & Graphics*, 22, č. 1, s. 37 – 54.
- COONS, S. A. (1964): Surfaces for computer-aided design of space forms. *Project MAC*. 105 s.
- CSIRIK, J., EPSTEIN, L., IMREH, C., LEVIN, A. (2010): Online clustering with variable sized clusters. *International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science*, s. 282 – 293.
- ČAPEK, R. a kol. (1992): Geografická kartografie. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 373 s.
- DE CASTELJAU, P. (1963): Courbes et surfaces à pôles. André Citroën, Automobiles SA, Paris.
- DEHAEMER JR, M., J., ZYDA, M. J. (1991): Simplification of objects rendered by polygonal approximations. *Computers & Graphics*, 2, č. 15, s. 175-184.
- DOUGLAS, D. H., PEUCKER, T. K. (1973): Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica: the international journal for geographic information and geovisualization*, 10, č. 2, s. 112 – 122.
- DU, X., YIN, B., KONG, D. (2007): Adaptive out-of-core simplification of large point clouds. *IEEE international conference on multimedia and expo*, s. 1439 – 1442.
- FEI, L., HE, J. (2009): A three-dimensional Douglas–Peucker algorithm and its application to automated generalization of DEMs. *International Journal of Geographical Information Science*, 23, č. 6, s. 703 – 718.

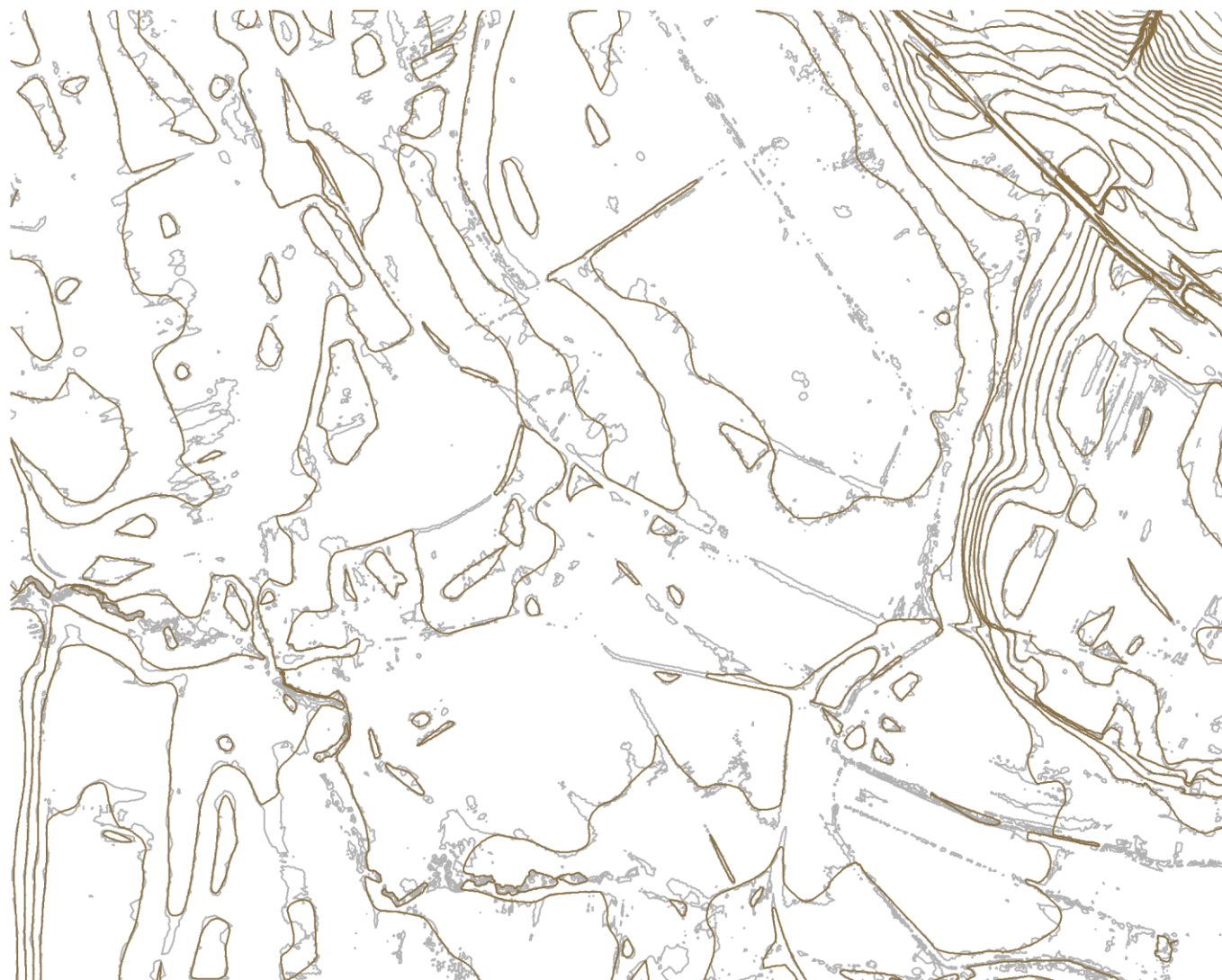
- FOTAKIS, D. (2006): Memoryless facility location in one pass. Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science, s. 608 – 620.
- GEOPORTAL (2019): Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. ČÚZK, Praha. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(xwtrip1fzbxqs55hfxjgglym\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&metadataXSL=full&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZZK-DMR5G-V](https://geoportal.cuzk.cz/(S(xwtrip1fzbxqs55hfxjgglym))/Default.aspx?mode=TextMeta&metadataXSL=full&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZZK-DMR5G-V) [cit. 2019-07-20].
- GOODCHILD, M. F., HUNTER, G. J. (1997): A simple positional accuracy measure for linear features. International journal of geographical information science, 11, č. 3, s. 299 – 306.
- GÖKGÖZ, T., SELÇUK, M. (2004): A new approach for the simplification of contours. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 39, č. 4, s. 37 – 44.
- GÖKGÖZ, T., (2005): Generalization of contours using deviation angles and error bands. The Cartographic Journal, 42, č. 2, s. 145 – 156.
- GRUPPI, M. G. a kol. (2015): An Efficient and Topologically Correct Map Generalization Heuristic. ICEIS, č. 1, s. 516 – 525.
- CHAIKIN, G. M. (1974): An algorithm for high-speed curve generation. Computer graphics and image processing, 3, č. 4, s. 346 – 349.
- CHARIKAR, M, O'CALLAGHAN, L, PANIGRAHY, R. (2003): Better streaming algorithms for clustering problems. Proceedings of the thirty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing, s. 30 – 39.
- ICA (1967): Hundred Technical Terms in Cartography. International Association of Cartography.
- IMHOF, E. (1982): Cartographic Relief Presentation. Walter de Gruyter, Berlin, 388 s.
- IRIGOYEN, J., MARTIN, M. T., RODRIGUEZ, J. (2009): A smoothing algorithm for contour lines by means of triangulation. The Cartographic Journal, 46, č. 3, s. 262 – 267.
- JOY, K. I. (1999): Chaikin's algorithms for curves. Visualization and Graphics Re.
- KOCHANÉK, D. H., BARTELS, R. H. (1984): Interpolating splines with local tension, continuity, and bias control. Acm Siggraph Computer Graphics, 18, č. 3, s. 33 – 41.
- KOPPE, C. (1905): Über die zweckentsprechende Genauigkeit der Höhendarstellung in topographischen Plänen und Karten für allgemeine technische Vorarbeiten. Zeitschrift für Vermessungswesen, Stuttgart, 34, č. 1.
- LI, Z., OPENSHAW, S. (1992): Algorithms for automated line generalization based on a natural principle of objective generalization. International Journal of Geographical Information Systems, 6, č. 5, s. 373 – 389.
- LI, Z., WONG, M. (2008): Animating basic operations for digital map generalization with morphing techniques. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, č. 37, s. 637 – 642.

- LI, T., PAN, Q., GAO, L., LI, P. (2017): A novel simplification method of point cloud with directed Hausdorff distance, IEEE 21st International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), s. 469 – 474.
- LINSEN, L. (2001): Point cloud representation. Technical Report, Faculty of Computer Science, University of Karlsruhe: Univ., Fak. für Informatik, Bibliothek, 18 s.
- MANSOURYAR, M., HEDAYATI, A. (2012): Smoothing via iterative averaging (sia) a basic technique for line smoothing. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 4, č. 3, 307 – 311.
- MCMASTER, R. B. (1986): A statistical analysis of mathematical measures for linear simplification. *The American Cartographer*, 2, č. 13, s. 103 – 116.
- MCMASTER, R. B. (1989): The Integration Of Simplification And Smoothing Algorithms In Line Generalization. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 26, č. 1, s. 101 – 121.
- MOENNING, C., DODGSON, N. A. (2004): Intrinsic point cloud simplification. Proc. 14th GrahCon, 14, č. 23, s. 6 – 10.
- MULLER, J. C. (1987): The concept of error in cartography. *Cartographica. The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 24, č. 6, s. 1-15.
- PAULY, M., GROSS, M., KOBELT, L. P. (2002): Efficient Simplification of Point-Sampled Surfaces. Proceedings of the conference on Visualization'02, IEEE Computer Society, s. 163 – 170.
- PHIEN, H. N., & DEJDUMRONG, N. (2000): Efficient algorithms for Bézier curves. *Computer Aided Geometric Design*, 17, č. 3, s. 247–250.
- PICEK, J. (2017). Tvorba kartograficky správných vrstevnic z dat LLS v rovinatém terénu. Diplomová práce, UK, Praha. Přírodovědecká fakulta. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. 71 s.
- QIAN, H., ZHANG, M., WU, F. (2016): A new simplification approach based on the Oblique-Dividing-Curve method for contour lines. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, č. 5, 21 s.
- RAAB, O. (1935): Kritik der Fehlergrenzen für die Oberflächendarstellung in topographischen Karten. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 35, s. 541 – 553.
- RAPOSO, P. (2013). Scale-specific automated line simplification by vertex clustering on a hexagonal tessellation. *Cartography and Geographic Information Science*, 40, č. 5, s. 427 – 443.
- SCHROEDER, W. J., ZARGE, J. A., LORENSEN, W. E. (1992): Decimation of triangle meshes. *Siggraph*, 92, č. 26, s. 65 – 70.
- SIM, J. Y., LEE, S. U., KIM, C. S. (2005): Construction of regular 3D point clouds using octree partitioning and resampling. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 956 – 959 s.
- TURK, G. (1992): Re-tiling polygonal surfaces. *Siggraph*, 92, č. 26, s. 2 – 12.

- SONG, H., FENG, H. Y. (2009). A progressive point cloud simplification algorithm with preserved sharp edge data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5, č. 45, 583 – 592 s.
- UREÑA, M. A., MOZAS, A. T., PÉREZ, J. L. (2011): Preliminary analysis of accuracy of contour lines using positional quality control methodologies for linear elements. 25th International Cartographic Conference, Paříž, Francie, s. 3 – 8.
- VEVERKA, B., ZIMOVÁ, R. (2008): *Topografická a tematická kartografie*. České vysoké učení technické, Praha, 198 s.
- VISVALINGAM, M., WHYATT, J. D. (1993): Line generalisation by repeated elimination of points. *The cartographic journal*, 1, č. 30, s. 46-51.
- XIE, Z., WANG, H., WU, L. (2011): The improved Douglas-Peucker algorithm based on the contour character. 19th International Conference on Geoinformatics, s. 1 – 5.
- YAN, H. (2019): *Description approaches and automated generalization algorithms for groups of map objects*. Springer, Singapore, 228 s.
- ZANG, Y., YANG, B., LIANG, F., XIAO, X. (2018): Novel Adaptive Laser Scanning Method for Point Clouds of Free-Form Objects. *Sensors*, 7, č. 18, 28 s.
- ZHAO, P., WANG, Y., HU, Q. (2016): A feature preserving algorithm for point cloud simplification based on hierarchical clustering. *Proceedings of the 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Peking, Čína, s. 5581–5584.
- ZHOU, S., JONES, C. B. (2005): Shape-aware line generalisation with weighted effective area. *Developments in Spatial Data Handling*, Springer, Berlin, Heidelberg, s. 369 – 380.

## Seznam příloh

- Příloha 1: Srovnání vrstevnic generalizované metodou úhlového generalizačního potenciálu se vstupními vrstevnicemi interpolovanými z DMR5G
- Příloha 2: Srovnání vrstevnic generalizované metodou úhlového generalizačního potenciálu s vrstevnicemi ZTM5.
- Příloha 3: Flash USB obsahující Python skripty pro navržené generalizační metody



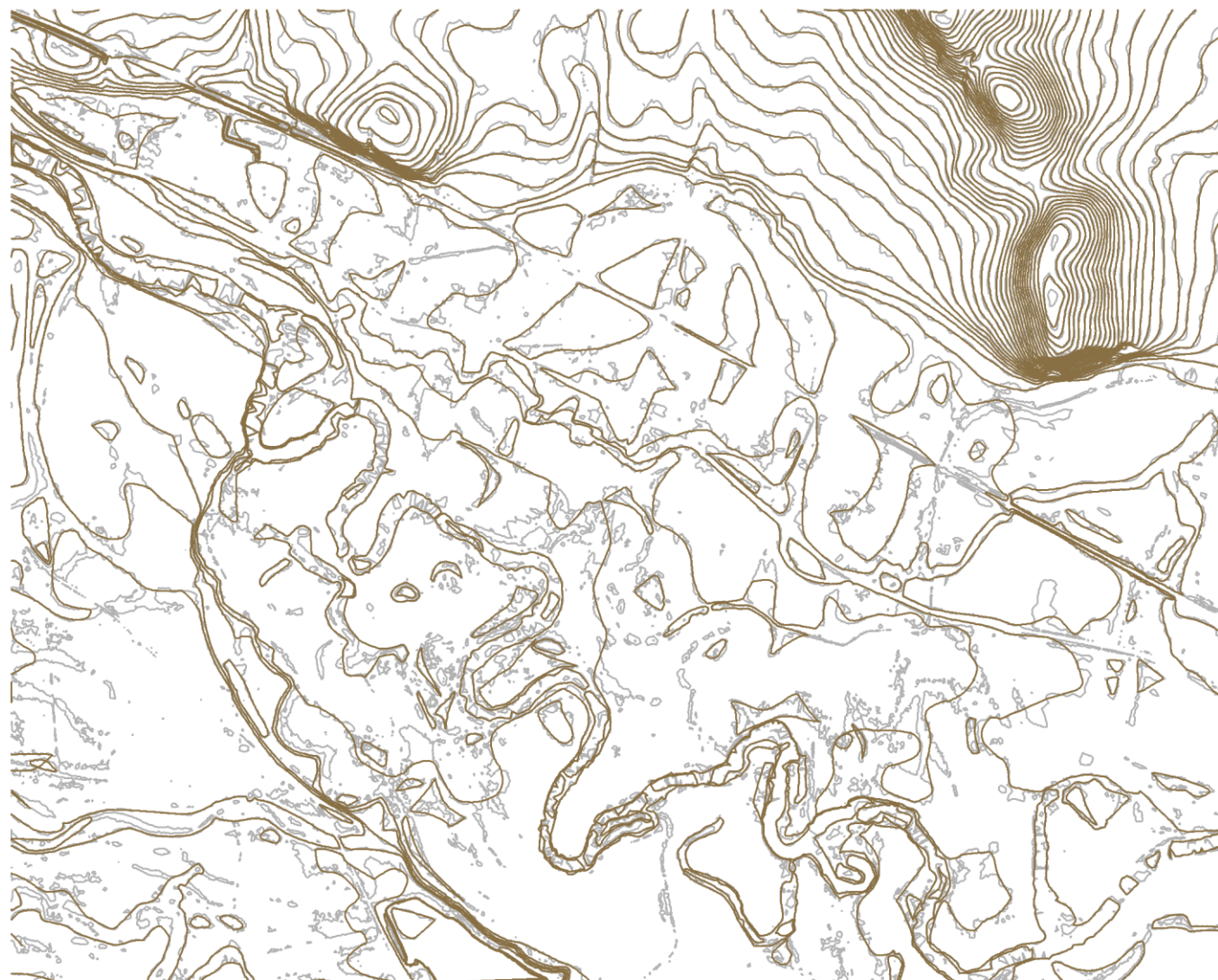
## Příloha 1a: Dubá 9-7

- generalizovaná vrstevnice
- vrstevnice interpolované z DMR5G

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m

## Příloha 1b: Hradec Králové 3-1

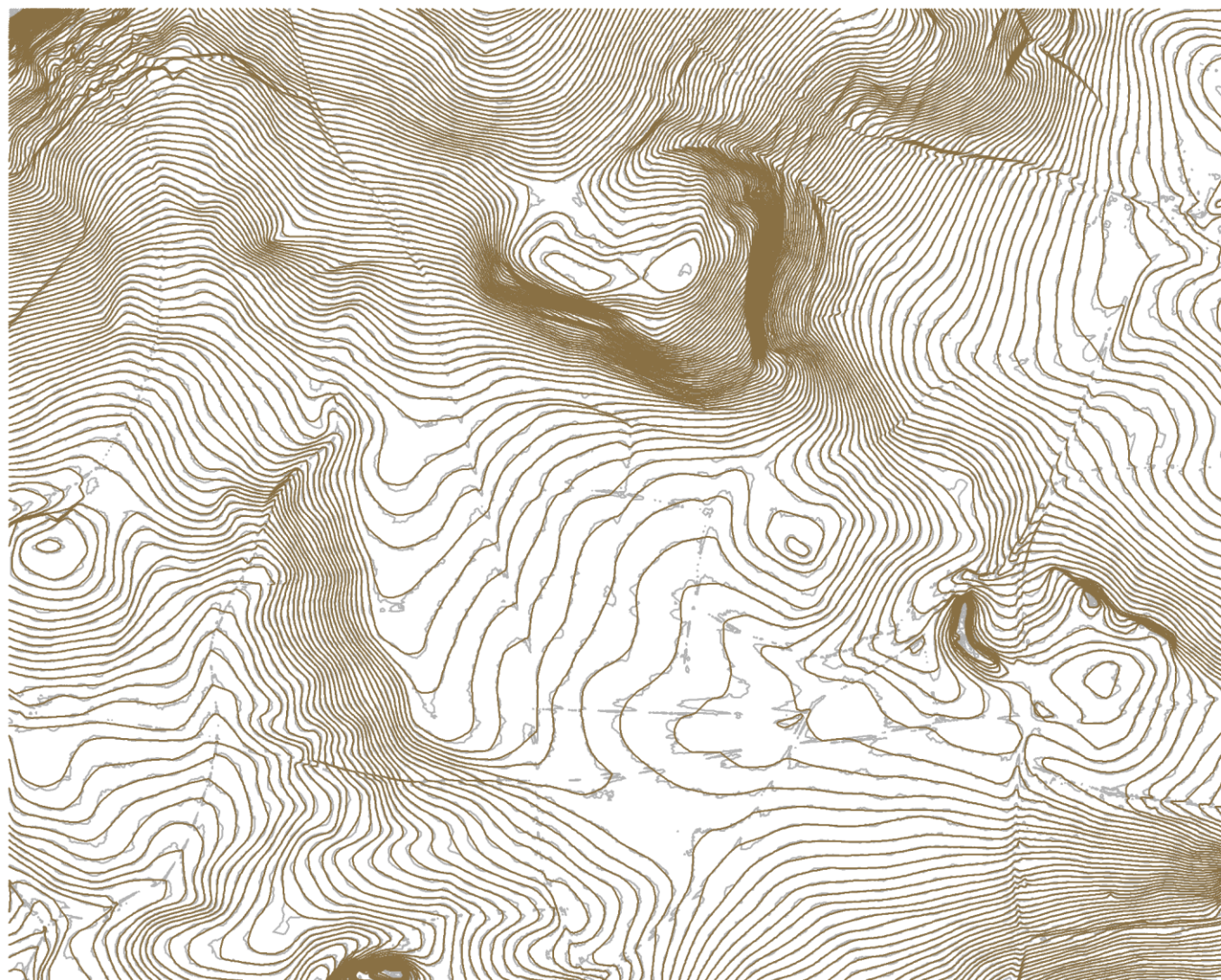


— generalizovaná vrstevnice  
— vrstevnice interpolované z DMR5G

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m





## Příloha 1c: Litoměřice 7-5

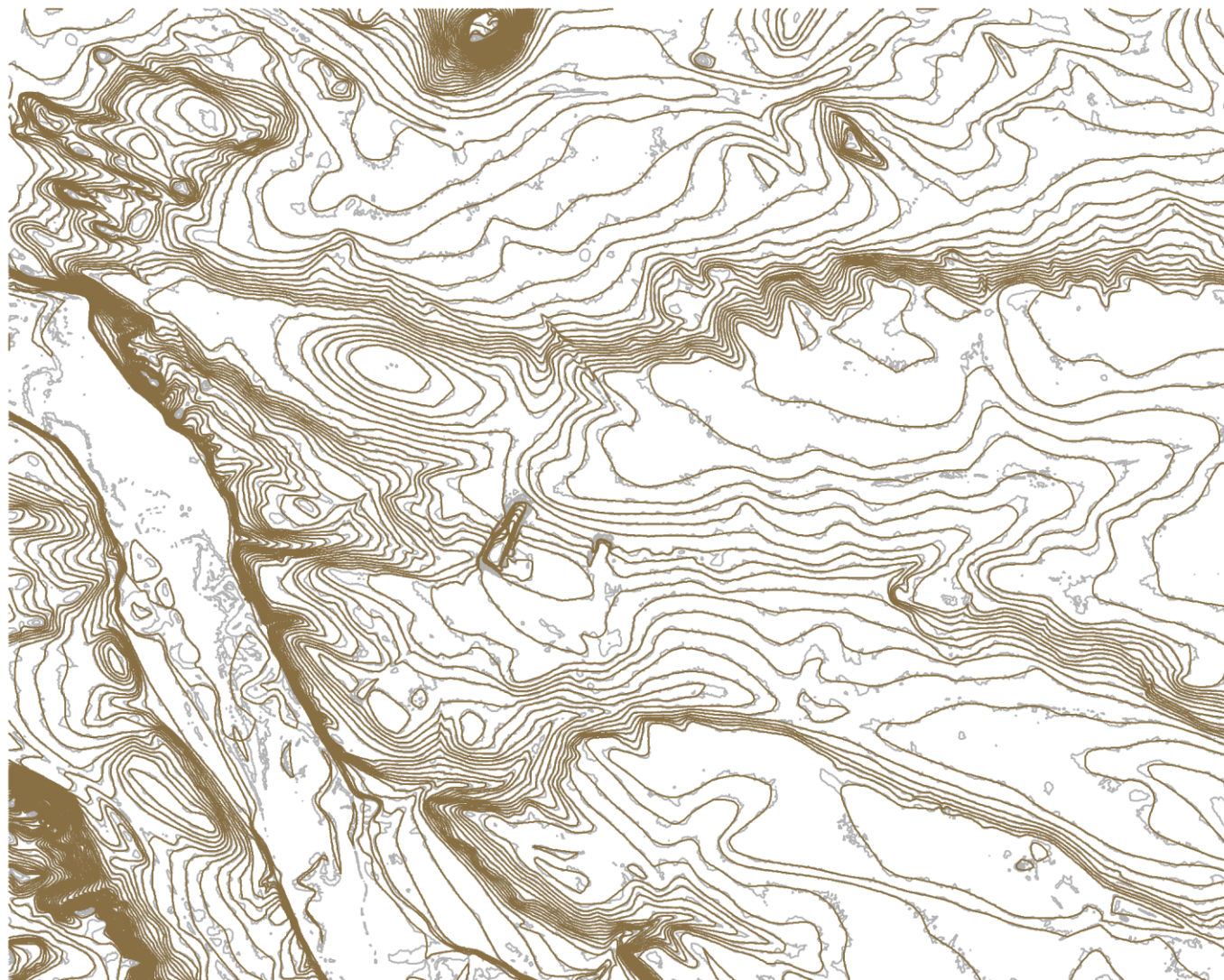
— generalizovaná vrstevnice

— vrstevnice interpolovaná z DMR5G

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m





## Příloha 1d: Mimoň 6-2

— generalizovaná vrstevnice

— vrstevnice interpolovaná z DMR5G

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m



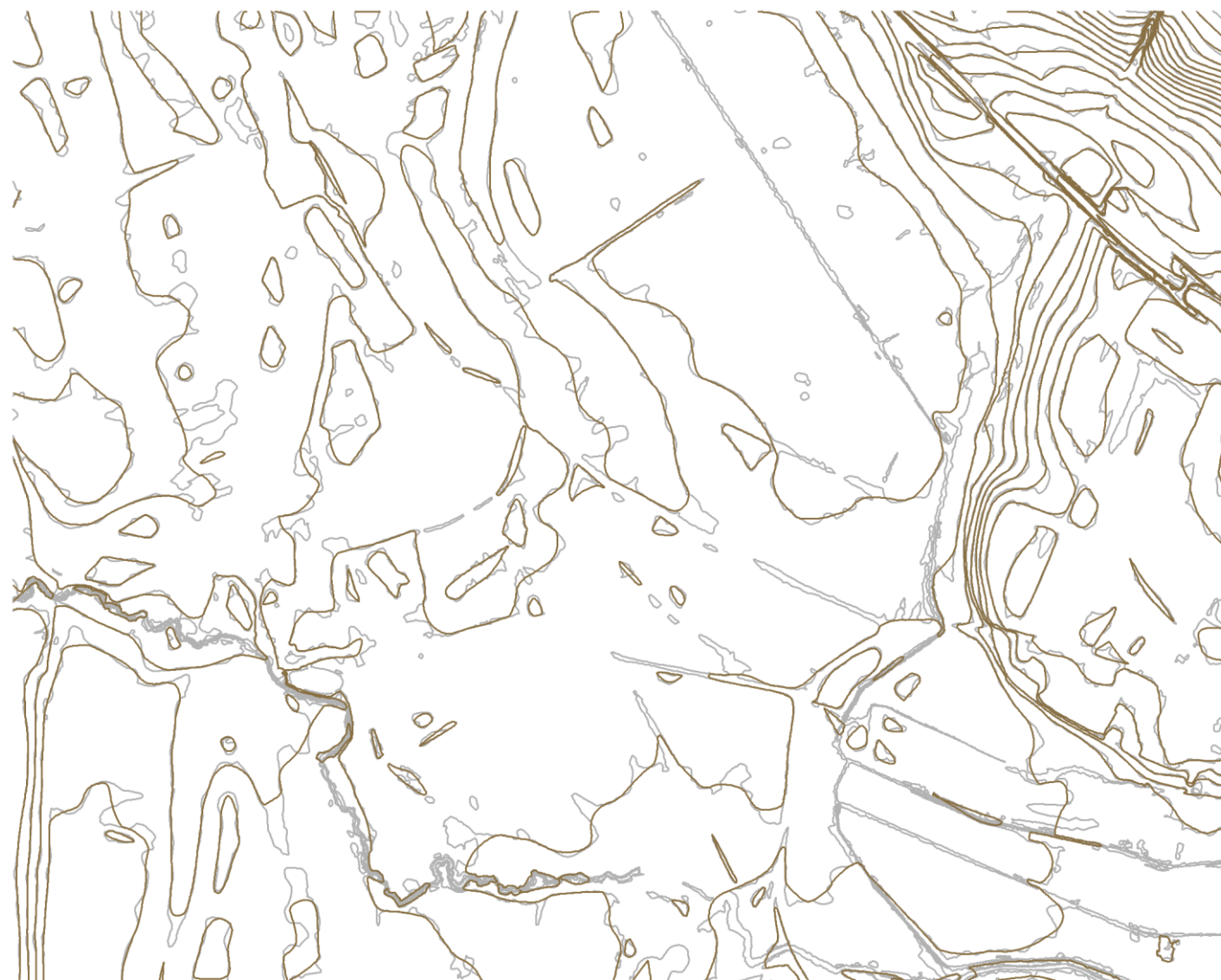
## Příloha 1e: Nymburk 5-9

— generalizovaná vrstevnice

— vrstevnice interpolovaná z DMR5G

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m



## Příloha 2a: Dubá 9-7

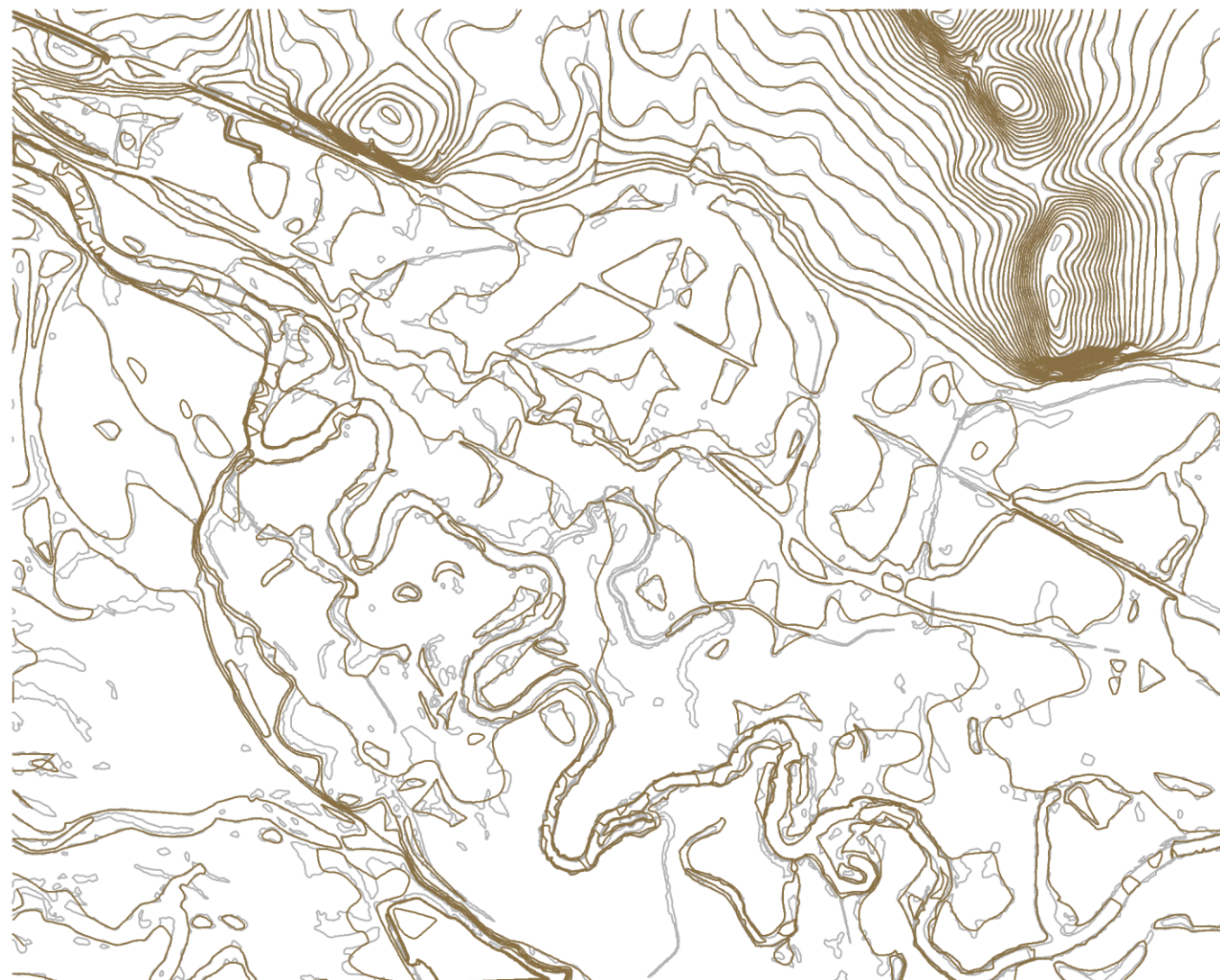
— generalizovaná vrstevnice  
— vrstevnice ZTM5

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m



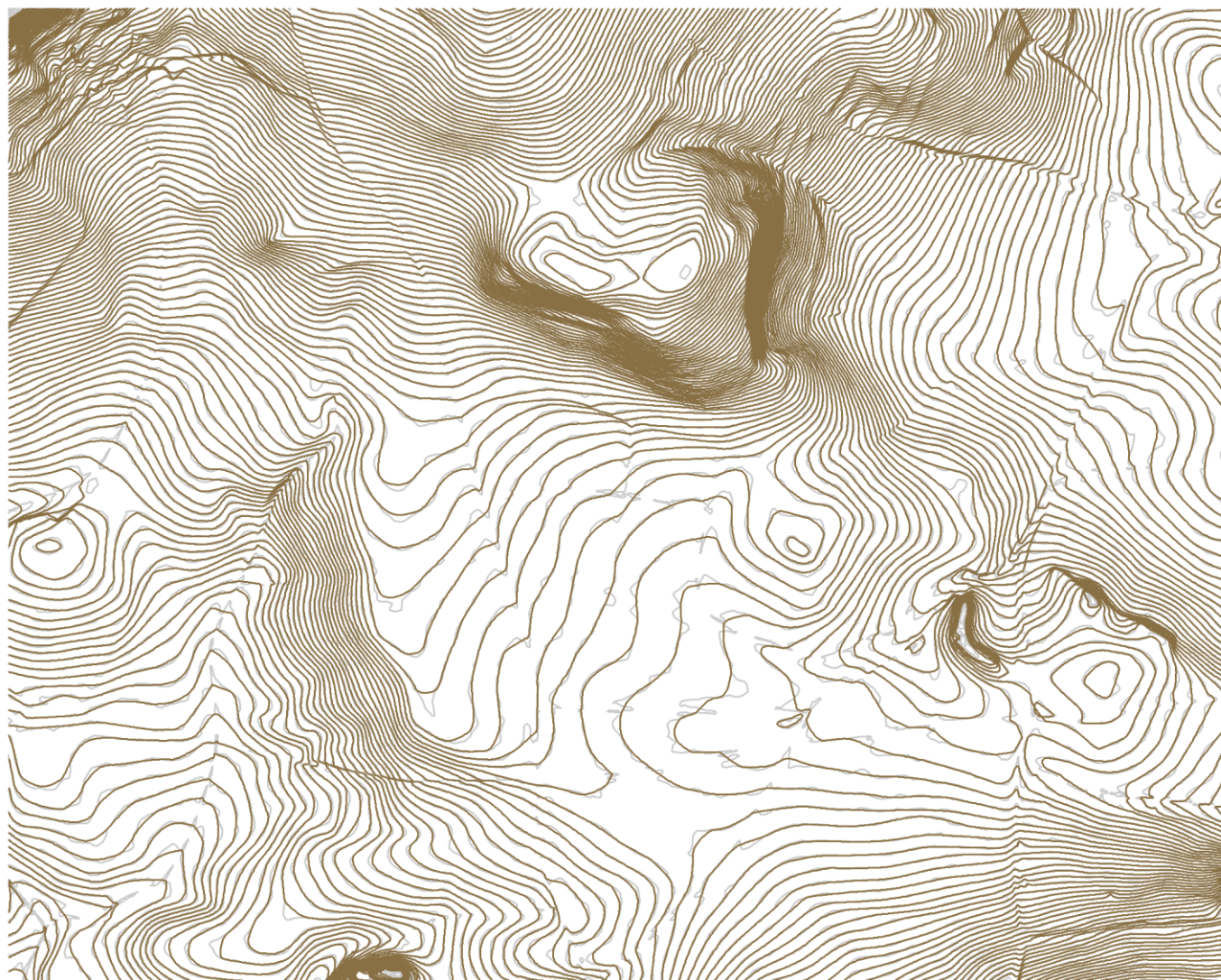
## Příloha 2b: Hradec Králové 3-1



— generalizovaná vrstevnice  
— vrstevnice ZTM5

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m



## Příloha 2c: Litoměřice 7-5

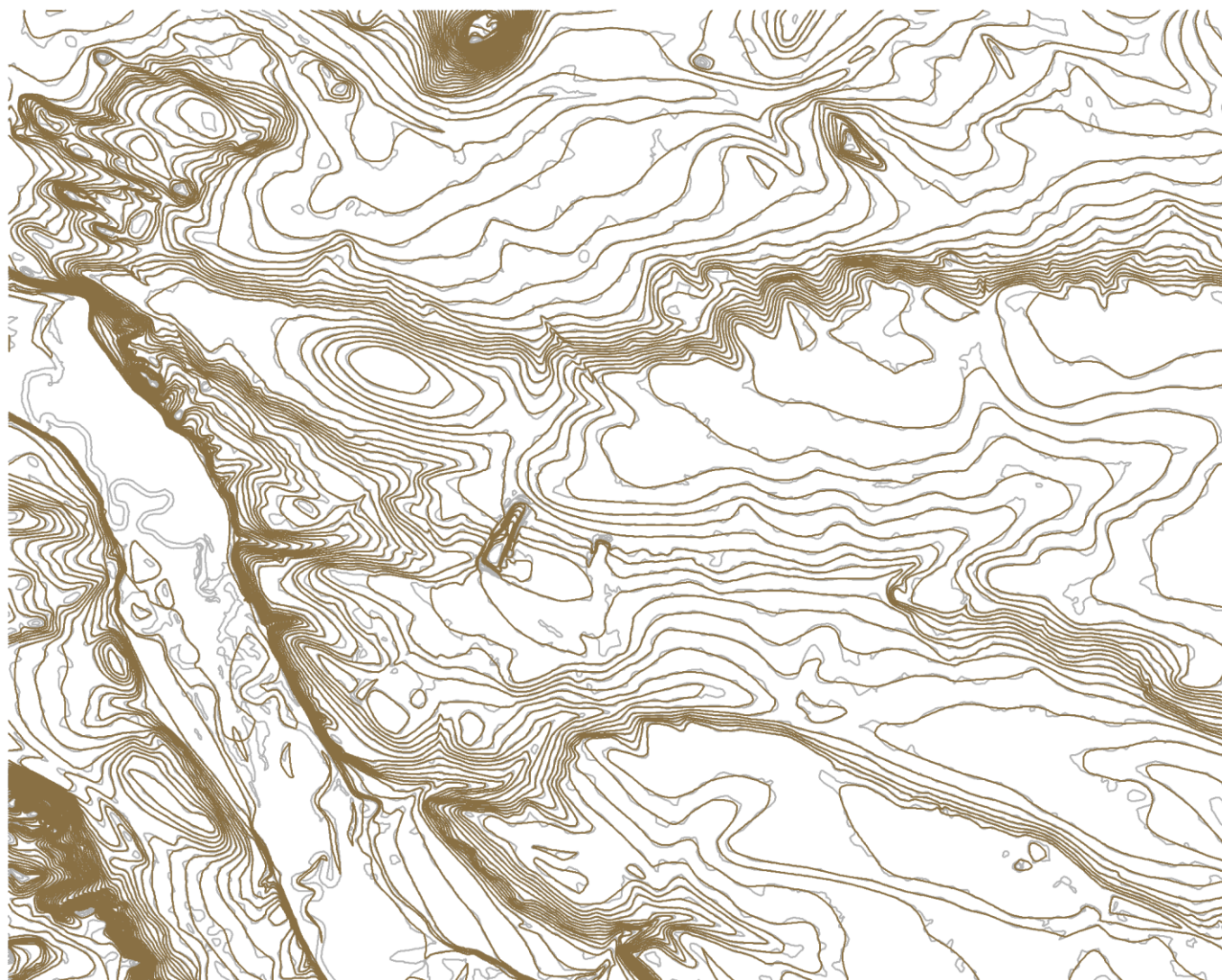
— generalizovaná vrstevnice

— vrstevnice ZTM5

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m





## Příloha 2d: Mimoň 6-2

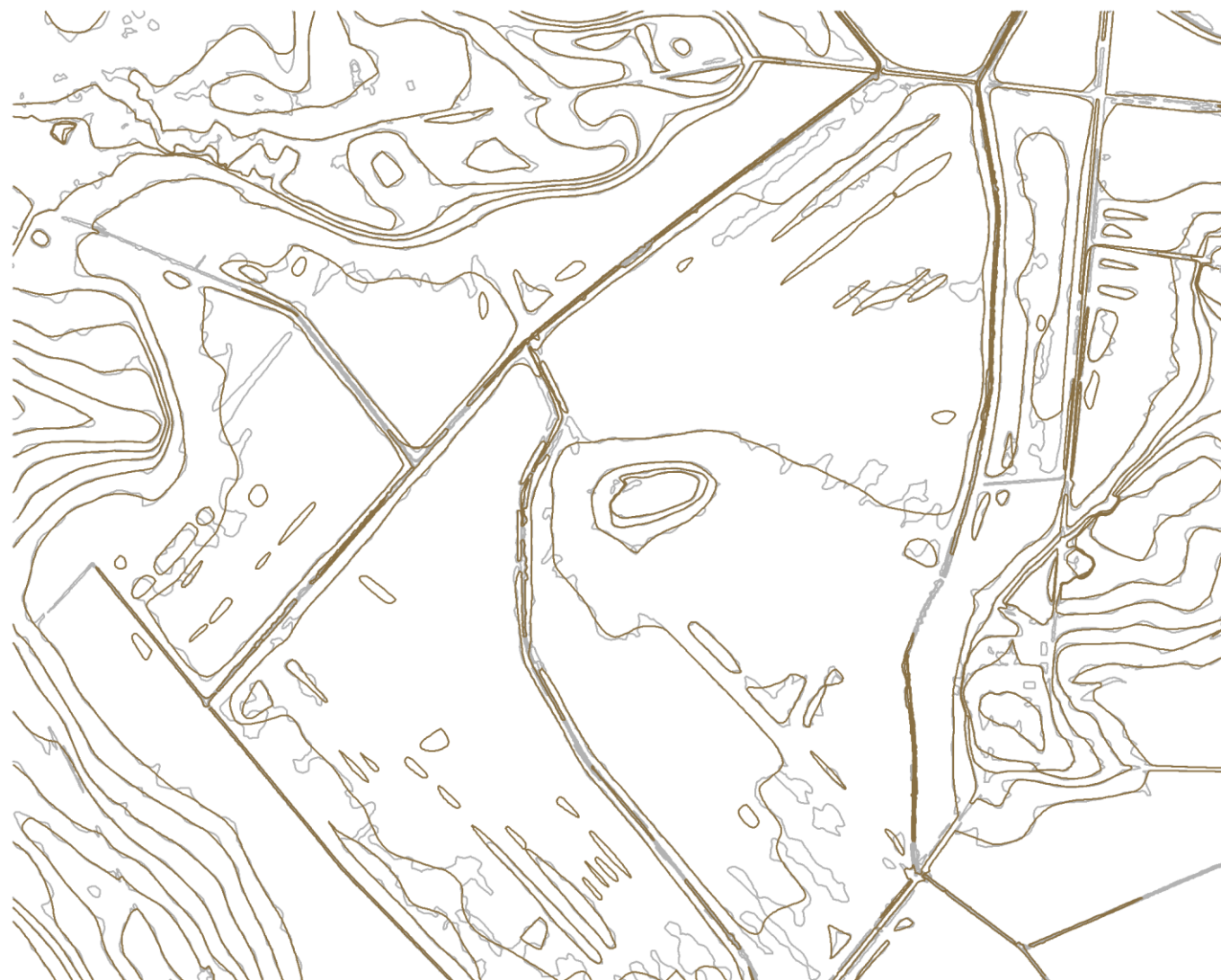
— generalizovaná vrstevnice

— vrstevnice ZTM5

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m

## Příloha 2e: Nymburk 5-9



— generalizovaná vrstevnice  
— vrstevnice ZTM5

Interval vrstevnic 1 m

0 500 m